

ATLAS実験における ダイボソン共鳴事象の探索

第2回CiRfSEワークショップ, 2016年1月19日

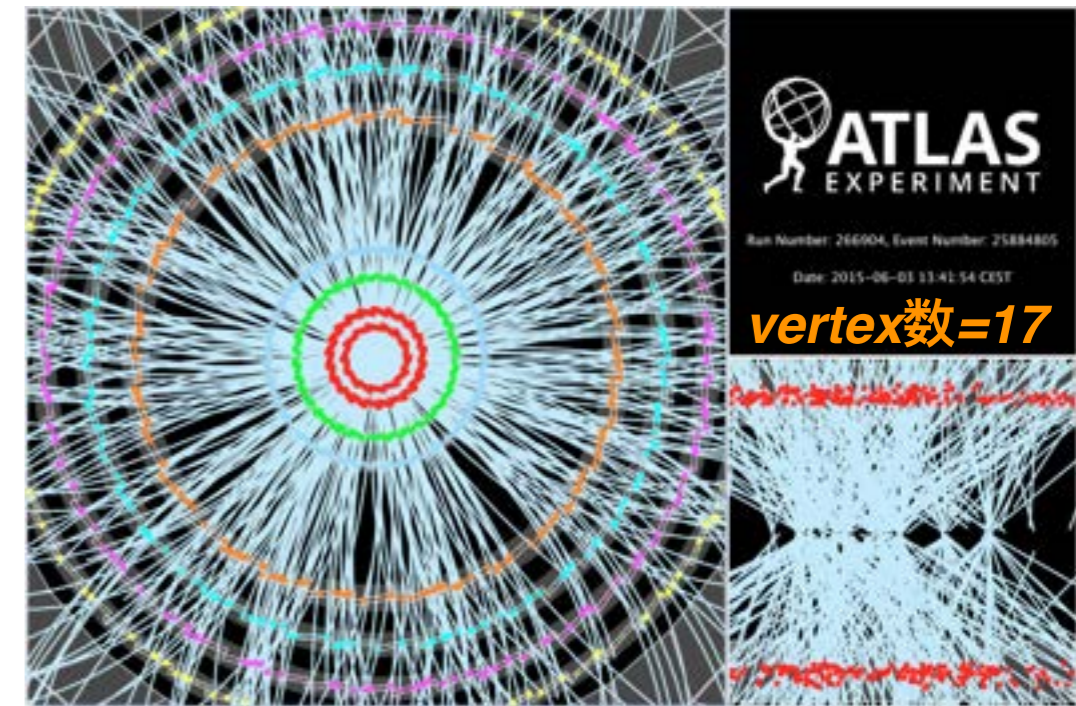
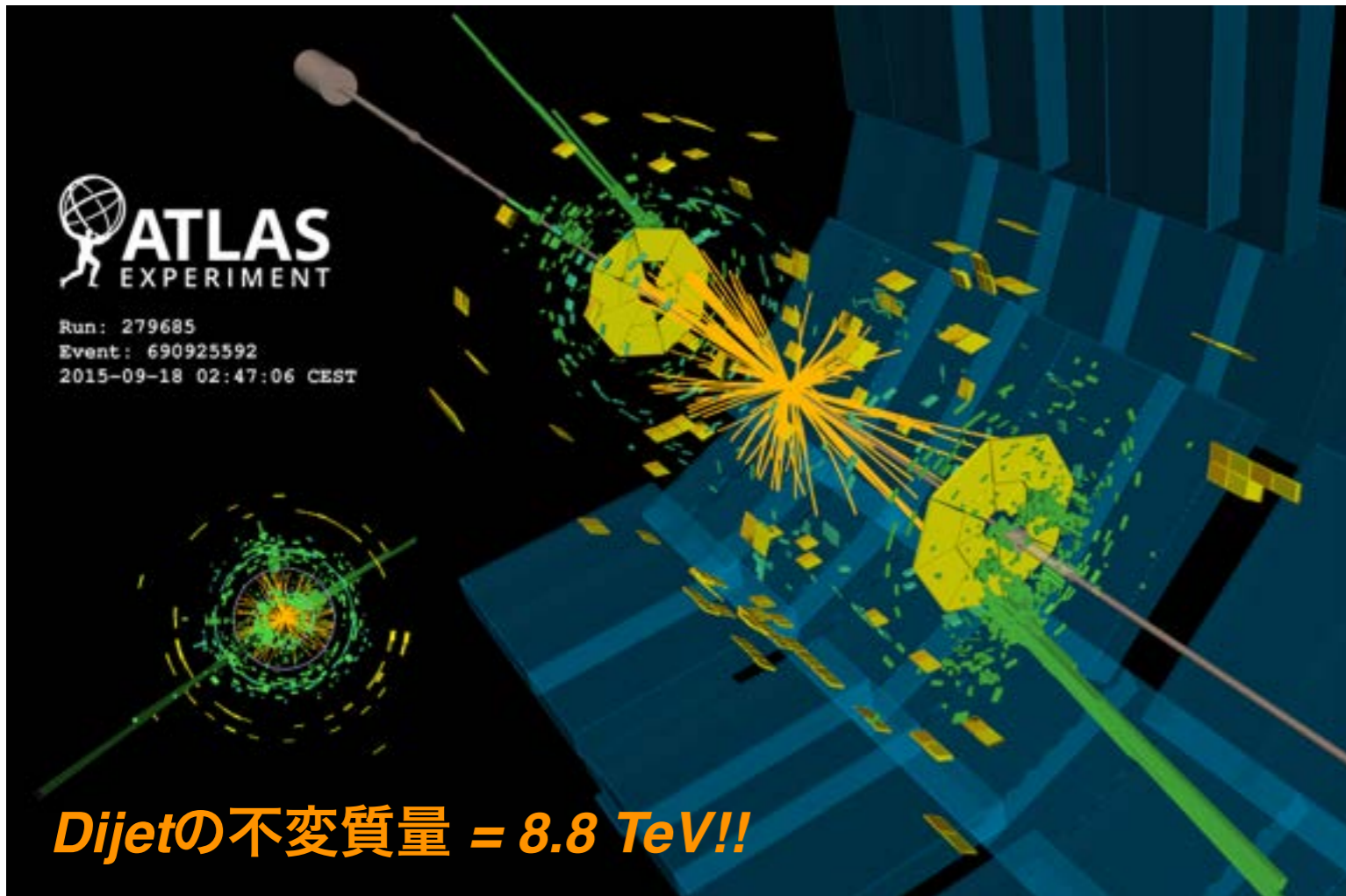
大川英希

筑波大学数理物質系・数理物質融合科学センター

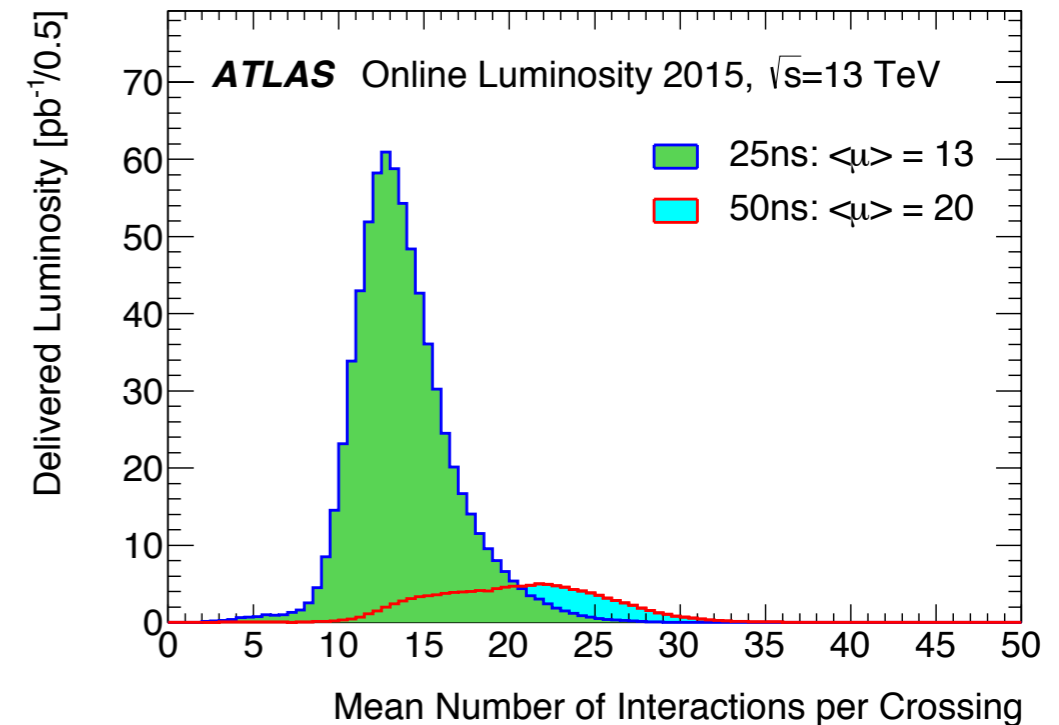




LHC Run-2始動!

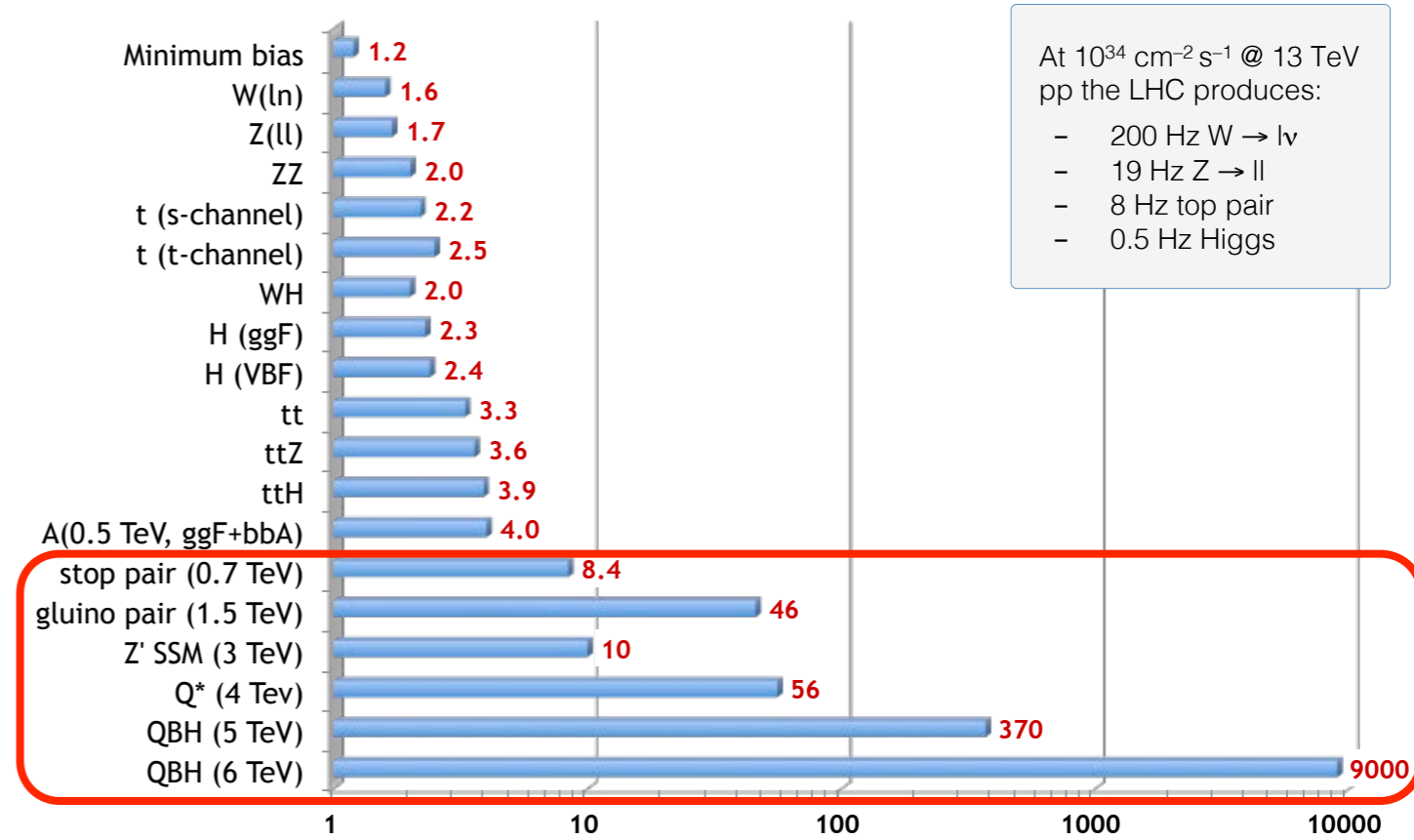
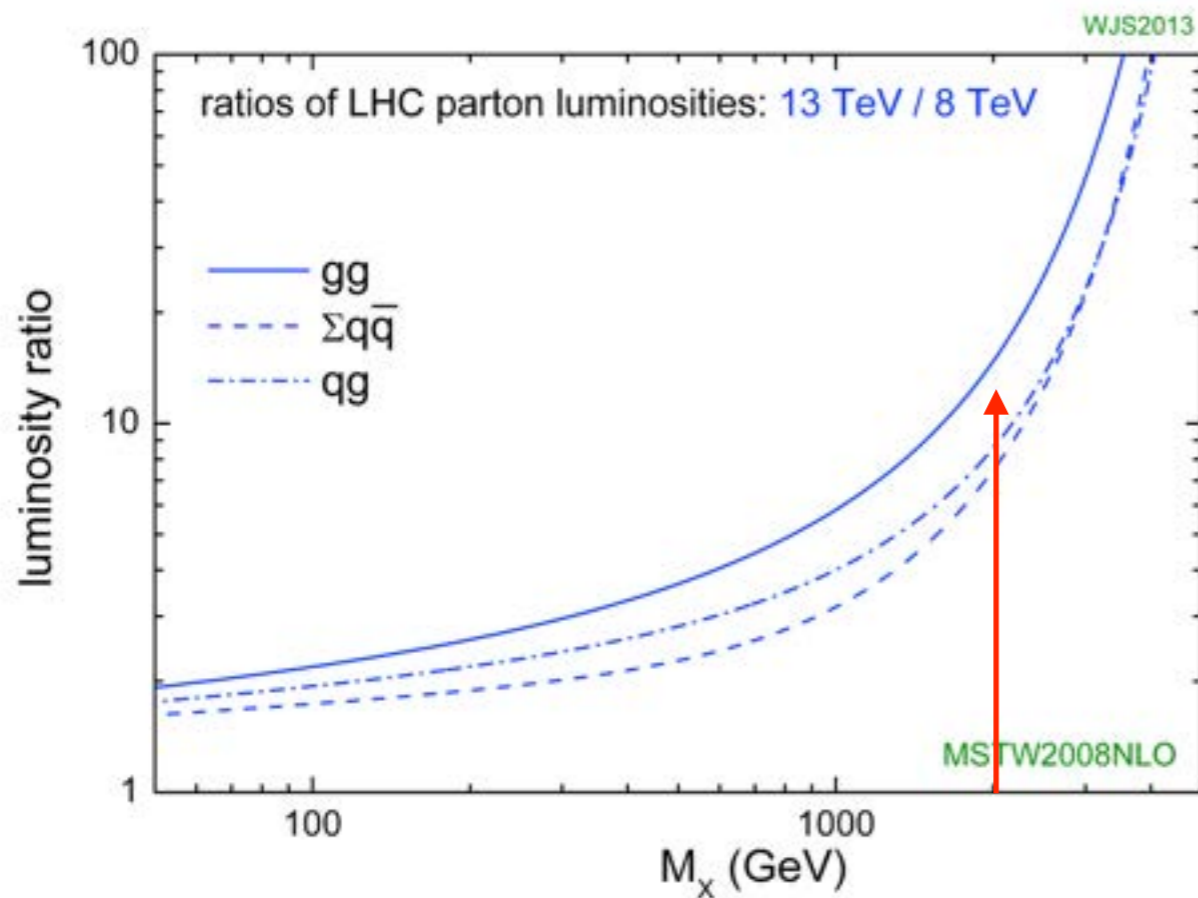


- 重心系エネルギーが、2012年までの8 TeVから、13 TeVに上がり、2015年からLHCが再始動!
- いよいよTeVスケールの物理の本格的な探索の時代に入った。





LHC @ $\sqrt{s}=13$ TeV



At $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @ 13 TeV
pp the LHC produces:

- 200 Hz $W \rightarrow l\nu$
- 19 Hz $Z \rightarrow ll$
- 8 Hz top pair
- 0.5 Hz Higgs

- 重心系エネルギーが13 TeVに増大したことに伴って、高エネルギー領域の parton luminosityも上昇。
- $M_x \sim \text{TeV}$ レベルの生成過程の断面積は、オーダー10倍程度上昇。
- **高統計のデータ取得を待たずとも、新物理の兆候が見える可能性がある。**

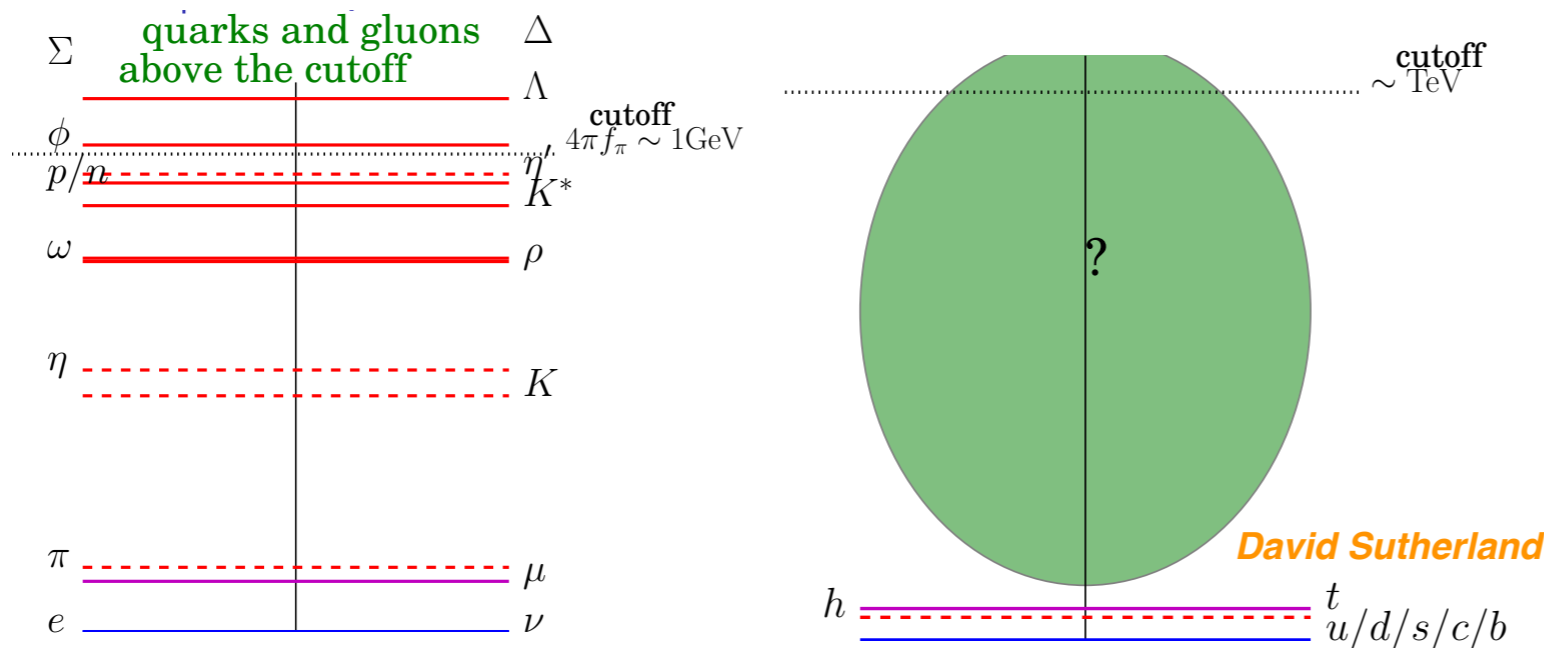


TeVスケールでの新物理



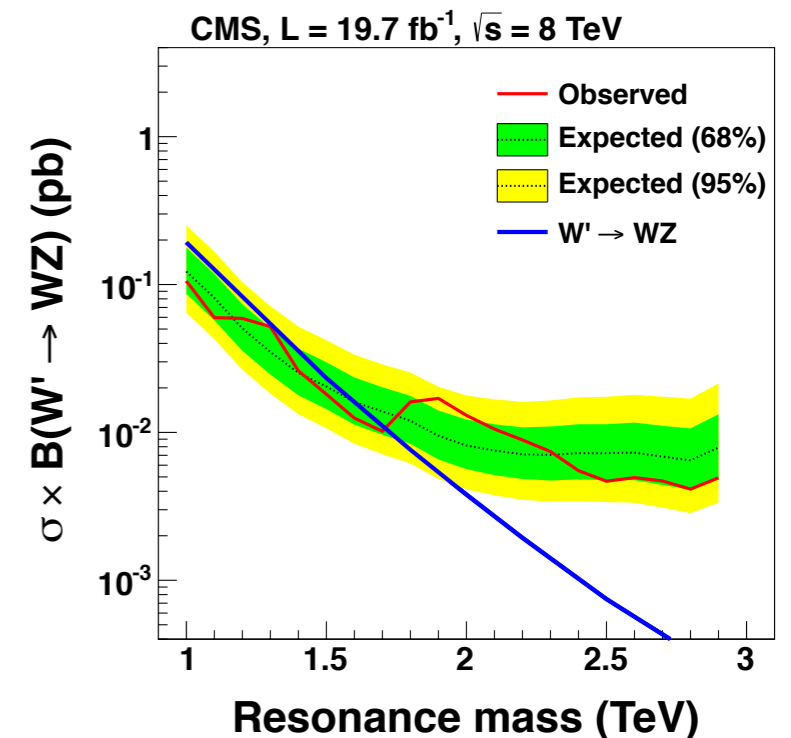
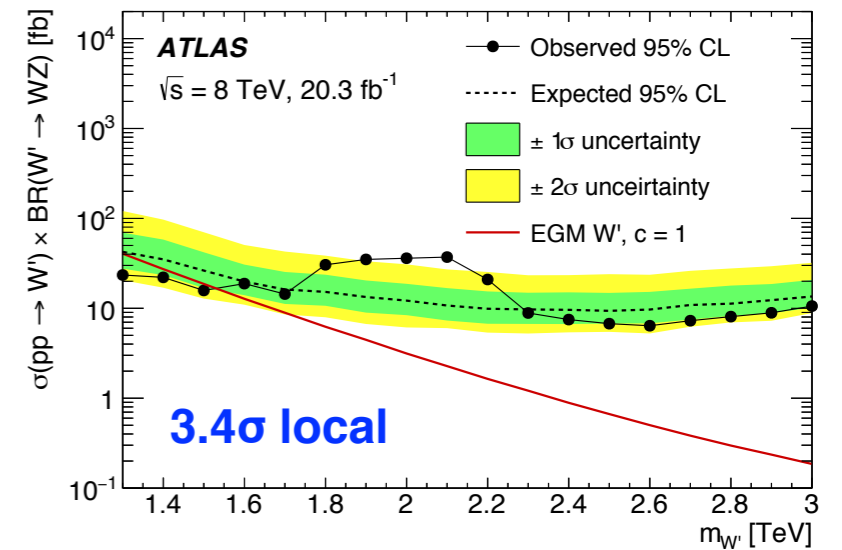
Naturalnessの要請から、TeVスケールで、新粒子・相互作用が存在する可能性がある

→ 超対称性、Walking Technicolor、複合ヒッグス粒子模型、その他



- TeVスケールの新粒子が、ボソン対に崩壊するケースが、多くのモデルで予想されている。
- Run-1では、ダイボソン共鳴事象などで、標準理論からの若干の逸脱が見られた。 Run-2で行われた追跡調査および、その他の結果について、報告する。

Run-1でのダイボソン共鳴事象探索



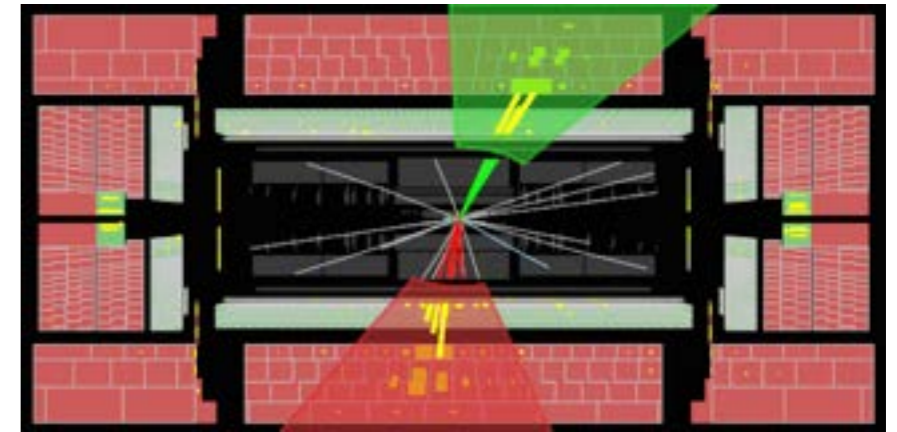
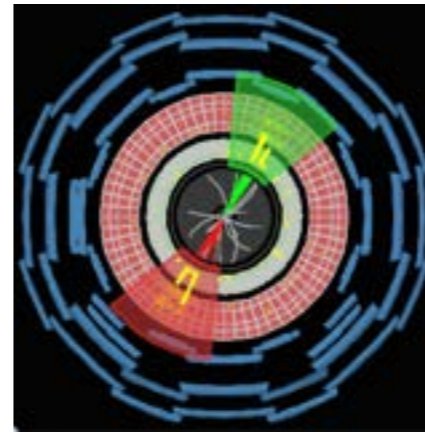


Run-2でのダイボソン共鳴探索



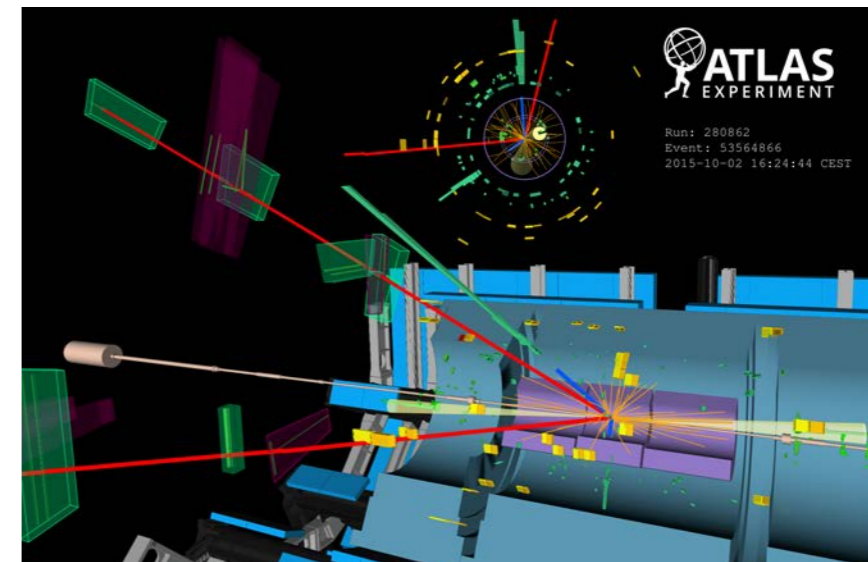
- 本講演では、以下の内容を網羅する。
- **W/Z/H Boson-tagging (large-R jets = J)を用いた探索**

- JJ, lvJ, llJ, vvJチャンネル



- **その他のダイボソン共鳴事象探索**

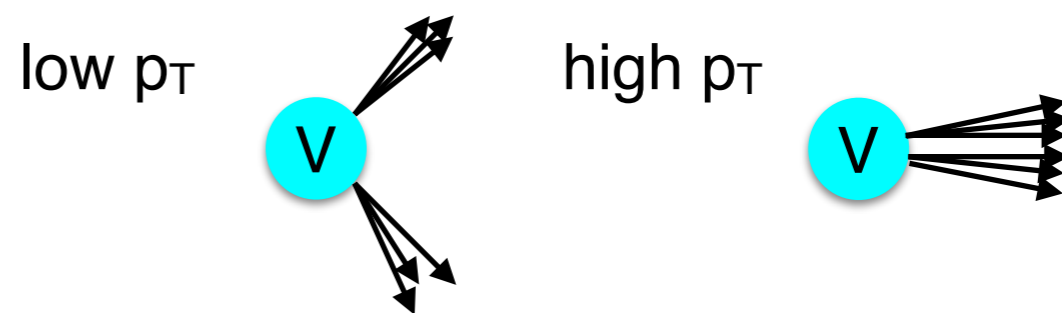
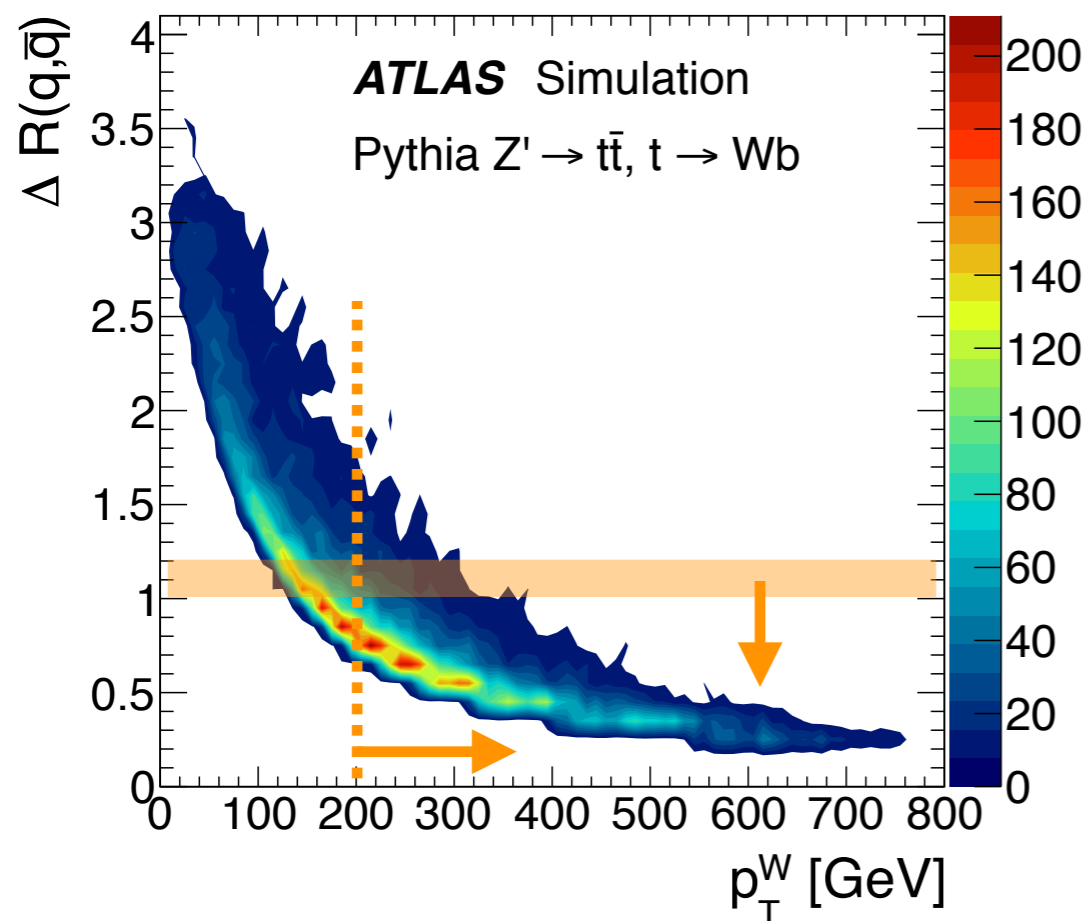
- **$\gamma\gamma$, ZZ \rightarrow 4l** チャンネル



Boson Taggingを用いた探索

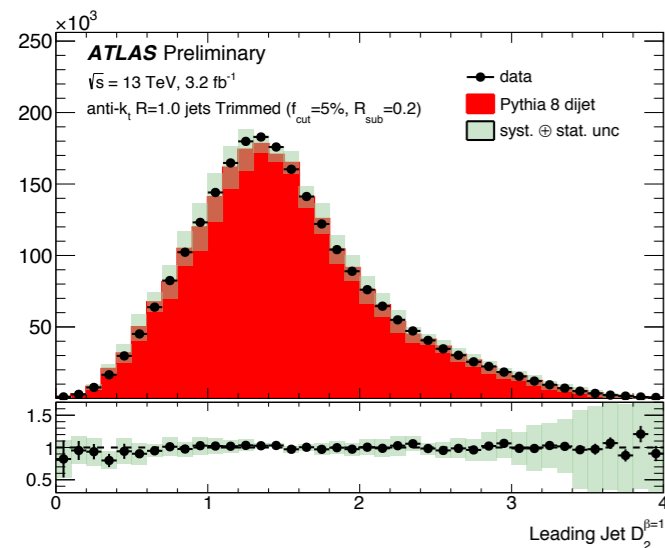


- **ボソン(W,Z,H)のハドロン崩壊を、large-Rジェットとして同定。** 崩壊粒子は、 $R \sim 2M/p_T$ の範囲内に収まる。
- High- p_T の領域で、W/Z/Hボソンを伴う新物理の探索の際に、高いシグナル感度を提供する。



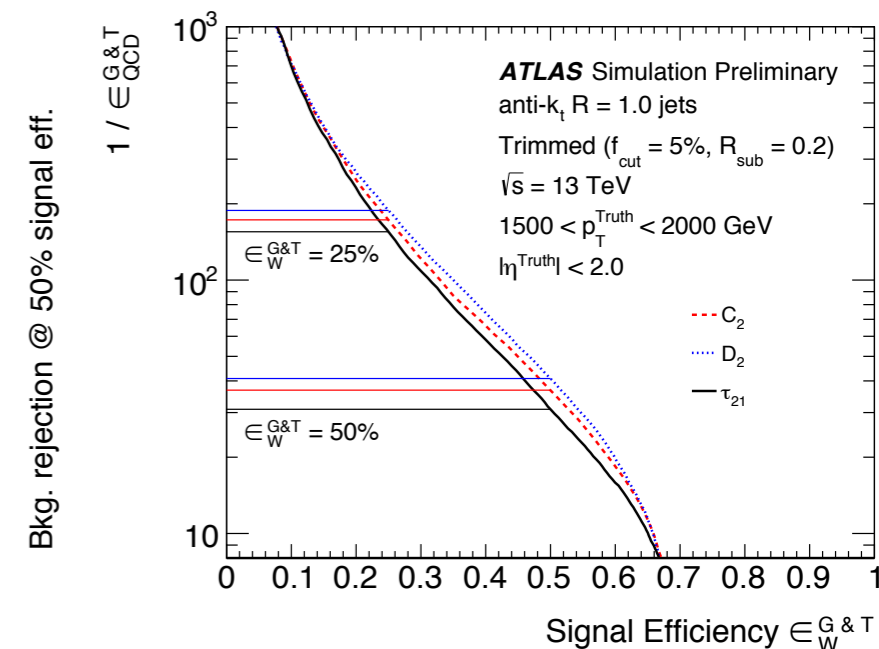
- Large-R (=1.2, 1.0)で、Cambridge-Aachenやanti- k_t アルゴリズムを用いてjet finding.
- Groomingと呼ばれる手法で、pileupなどから由来するsubjettを除去。
- C_2 , D_2 , τ_{21}^{wta} などのsubstructure変数を用いて、**multijet**などのBG rejectionを高める。
↑
n点エネルギー相関や、N-subjettiness

Taggingの性能

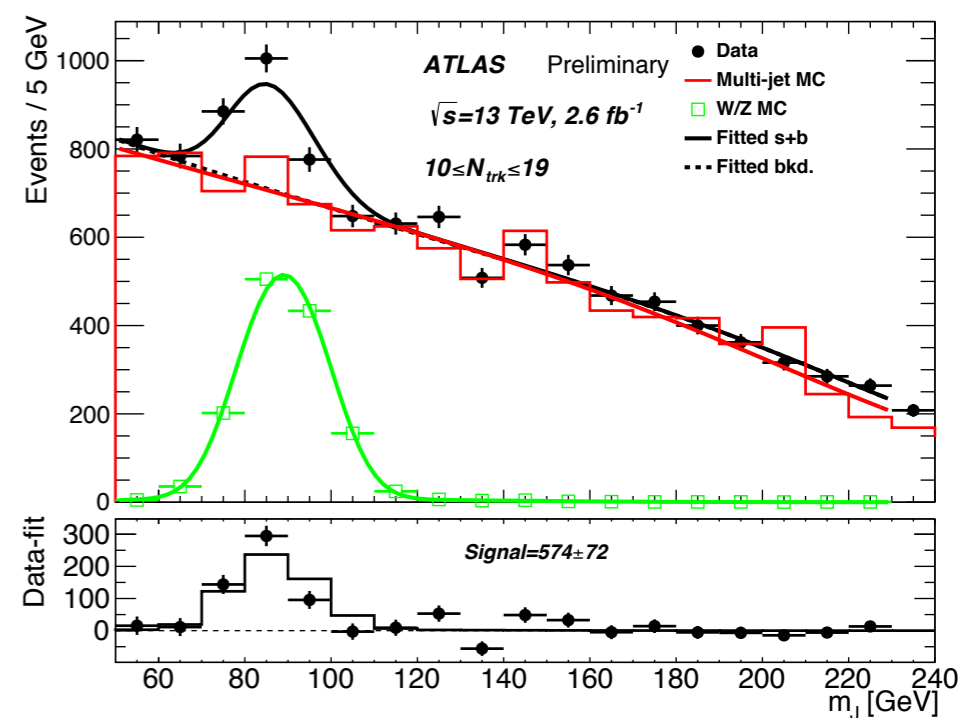


ATLAS Simulation Preliminary
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ★ = Optimal grooming + tagging combination
 $|\eta^{\text{Truth}}| < 2.0, 200 < p_T^{\text{Truth}} < 350 \text{ GeV}, M^{\text{Reco}} \text{ Cut}$ W-jets

C/A R = 1.0 jets Pruned $R_{\text{cut}} = 0.5, z_{\text{cut}} = 15\%$	30.2 ± 0.3	40.8 ± 0.5	40.0 ± 0.5	11.2 ± 0.1
C/A R = 1.2 jets Split-Filtered $\mu = 1.0, y_{\text{filt}} = 15\%$	33.5 ± 0.4	27.7 ± 0.4	30.0 ± 0.4	12.5 ± 0.1
C/A R = 1.2 jets Split-Filtered $\mu = 1.0, y_{\text{filt}} = 4\%$	32.3 ± 0.4	39.1 ± 0.5	37.7 ± 0.5	8.6 ± 0.0
anti- k_t R = 1.0 jets Trimmed $f_{\text{cut}} = 5\%, R_{\text{sub}} = 0.2$	51.0 ± 0.7	55.3★ ± 0.9	51.9 ± 0.8	22.0 ± 0.2
	M + C ₂	M + D ₂	M + τ_{21}	M



- Groomingやsubstructureは、データをよく再現できている。
- Anti- k_t R=1.0, trimmed ($f_{\text{cut}}=5\%$, $R_{\text{sub}}=0.2$)に p_T 依存の D_2 カットをかけたものを、Run-2の標準として採用。
- Higgs-taggingについては、更にb-tagも要求。

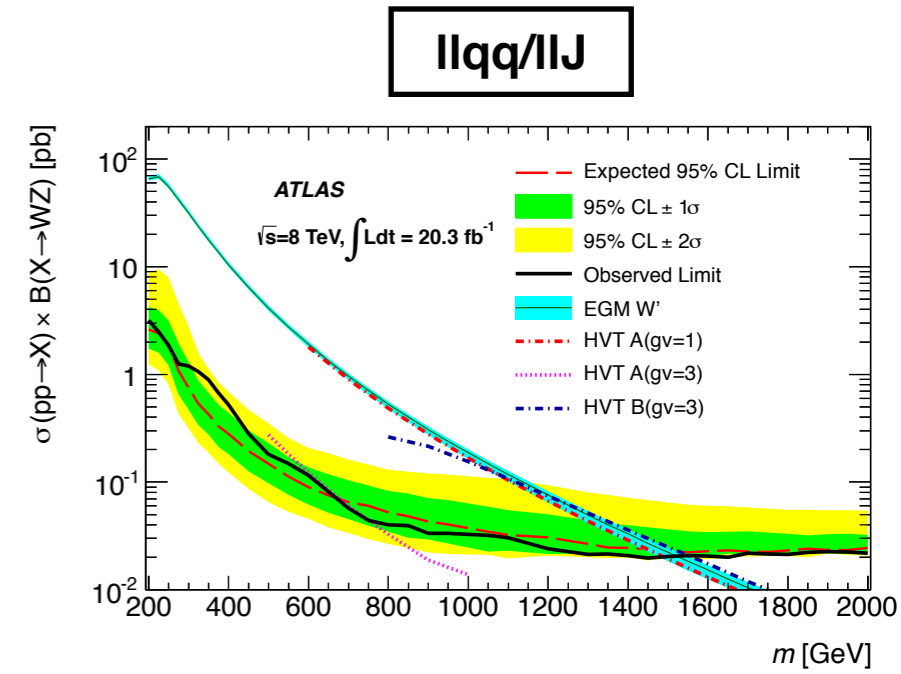
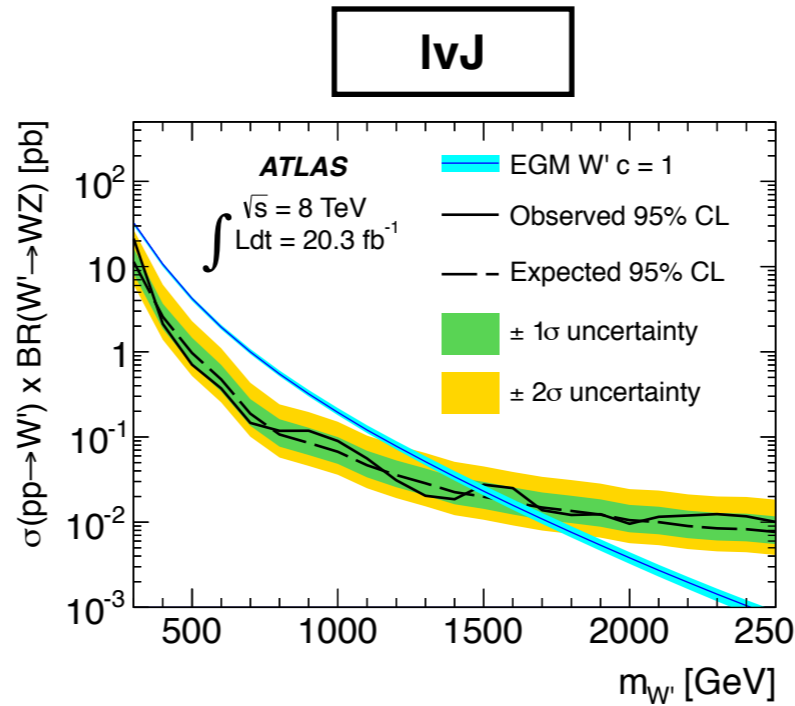
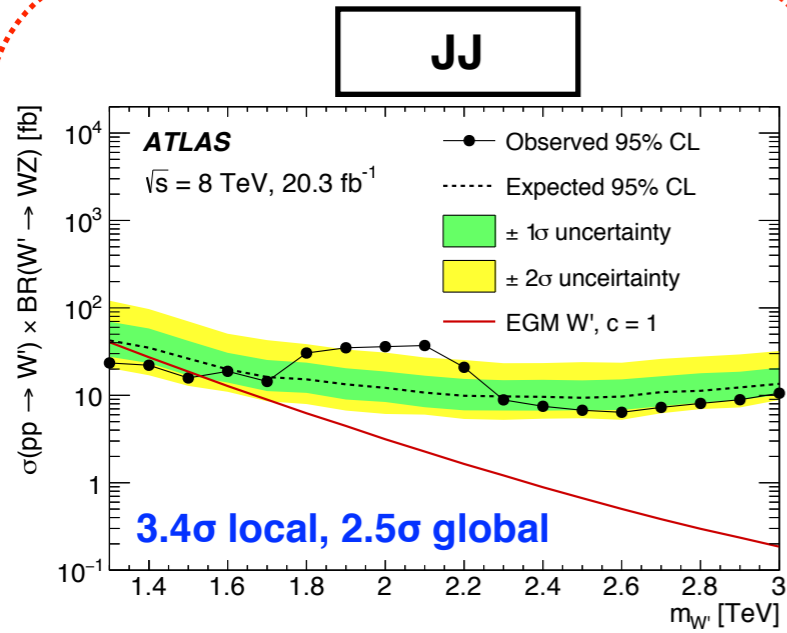




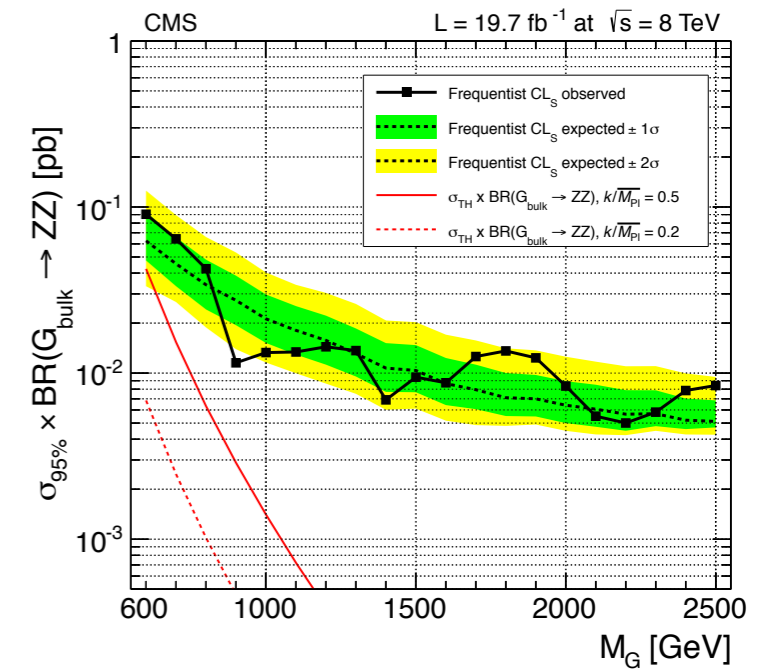
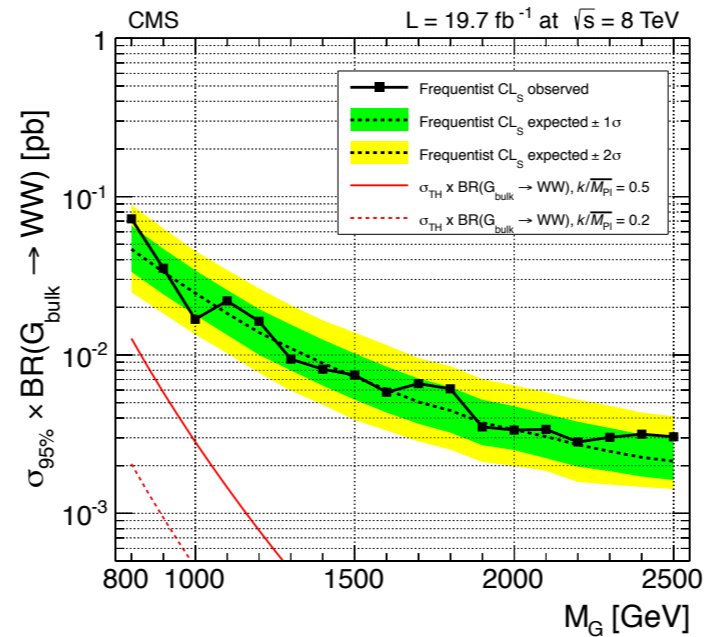
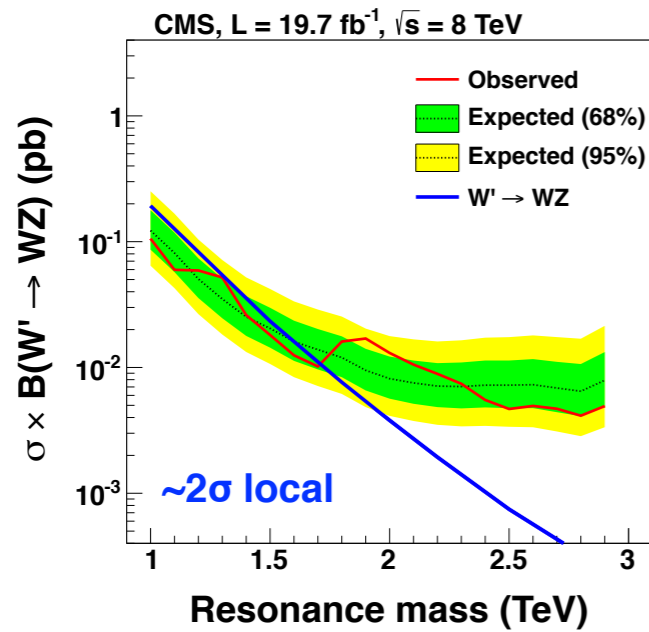
Run-1での結果



ATLAS



CMS

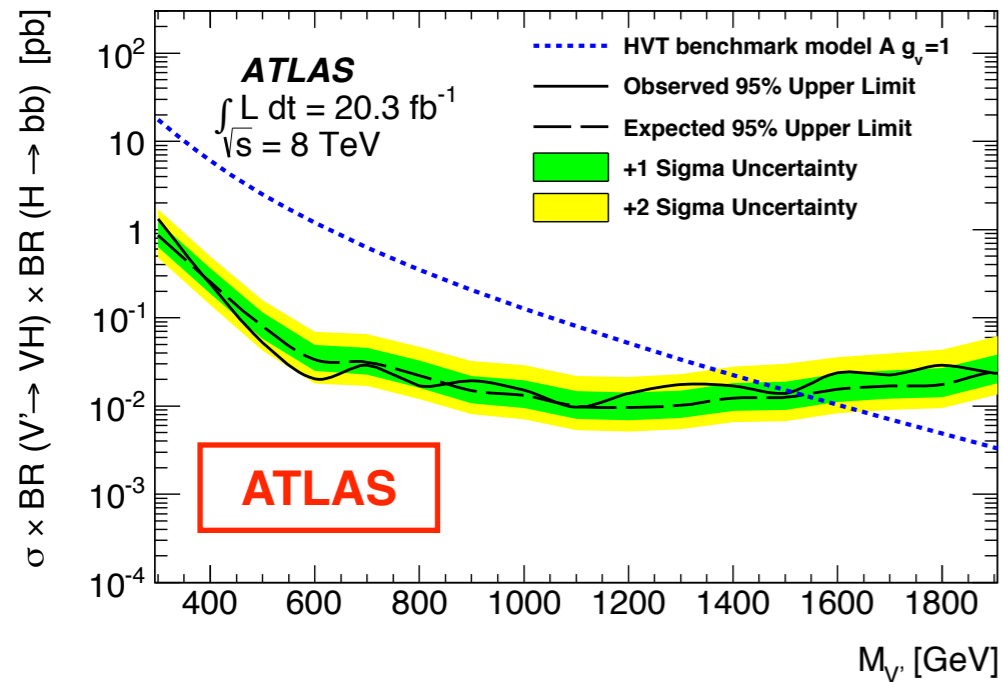




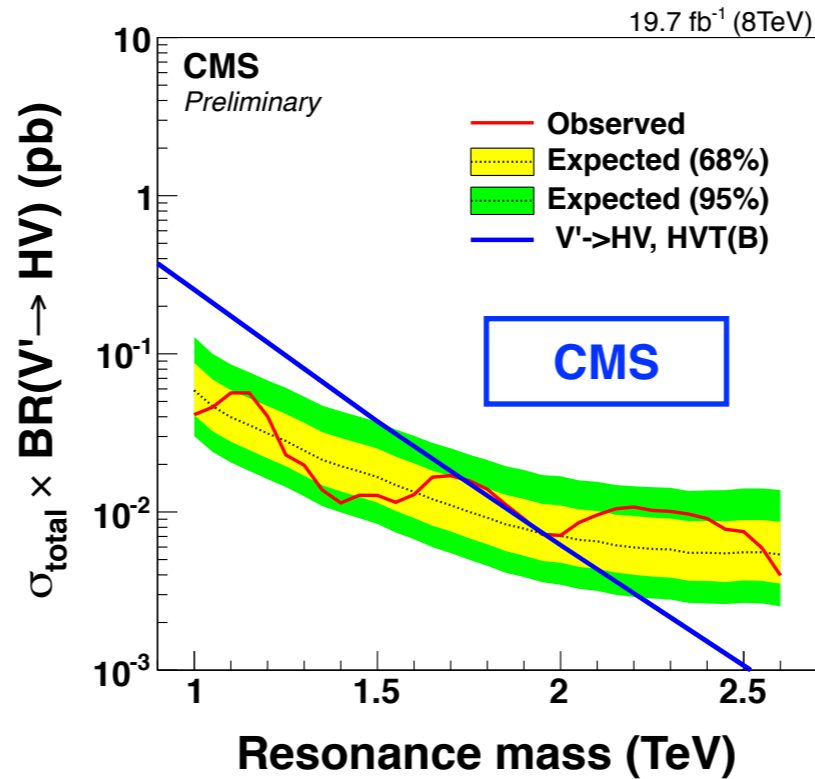
Run-1での結果 (H関連)



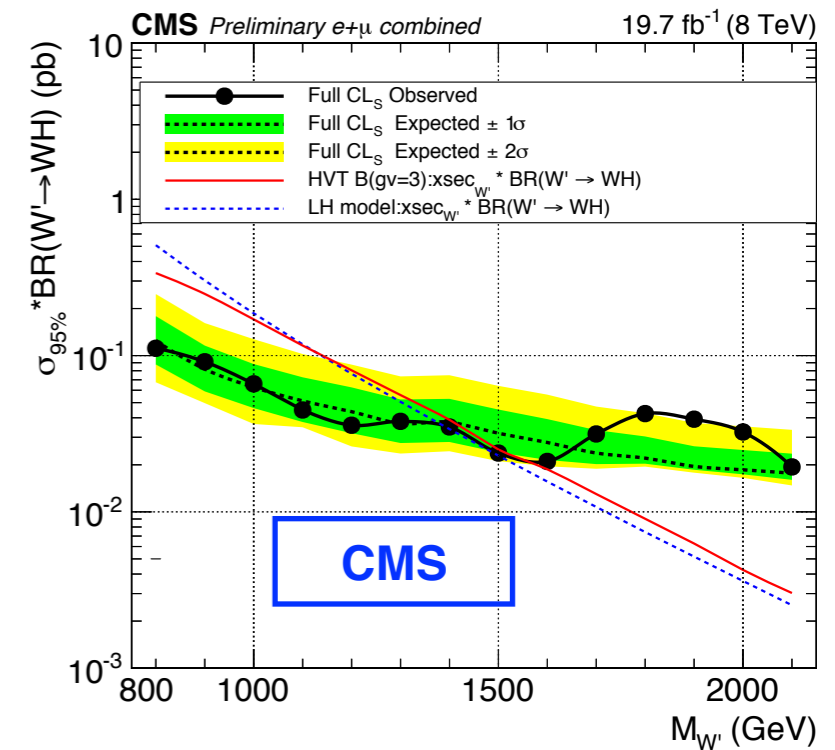
ll/lv/vvH(→bb)



VH→JJ



lvH(→bb)



- ダイボソン事象全般に、有意な逸脱は無いものの、不変質量 2 TeV付近が怪しい？ (ただし、全てのチャンネルで起きているわけではない)
- Run-2での追跡調査が、重要！



VV → qqqq(JJ)探索



ATLAS-CONF-2015-073

- ハドロン崩壊の終状態。最も崩壊比が大きいいため、高統計のデータ。
- バックグラウンド除去のため、Boosted-boson taggingに加えて、dijet rapidity 差 $\Delta Y_{12} < 1.2$ と、 $N_{Trk} < 30$ 、 $(p_{T1}-p_{T2})/(p_{T1}+p_{T2}) < 0.15$ を要求。

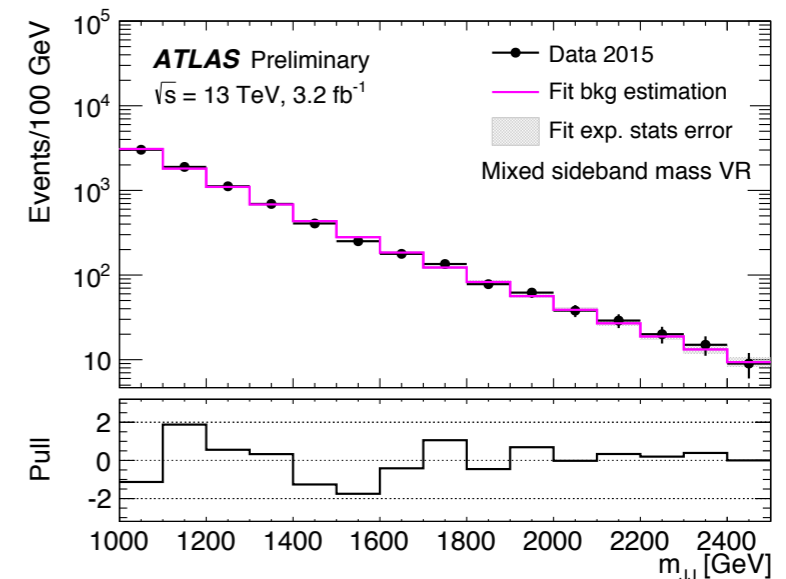
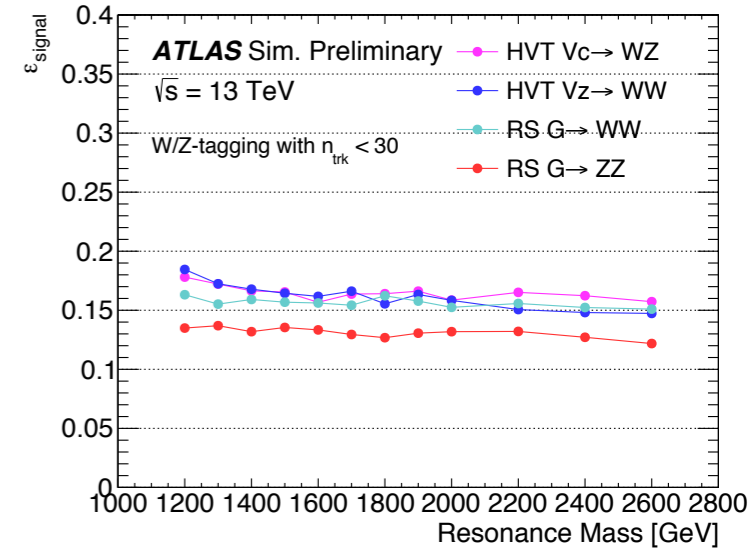
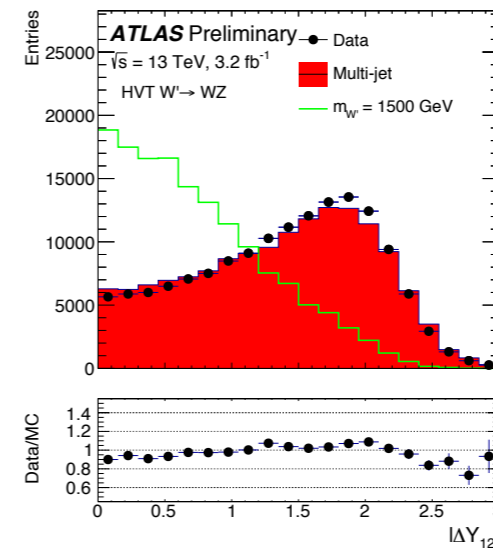
- **Large-R jetsの不変質量分布に対して bump hunting.**

$$\frac{dn}{dx} = p_1(1-x)^{p_2-\xi p_3} x^{p_3}, \quad x = m_{jj}/\sqrt{s}$$

- **Large-R jetの質量 ($|m_{jj} - m_{W/Z}| < 30$ GeV を要求) → WZ/WW/ZZのシグナル領域に重複あり。**

- Higgs-tagging veto有り。

- m_{JJ} のサイドバンドで、データを良く再現。

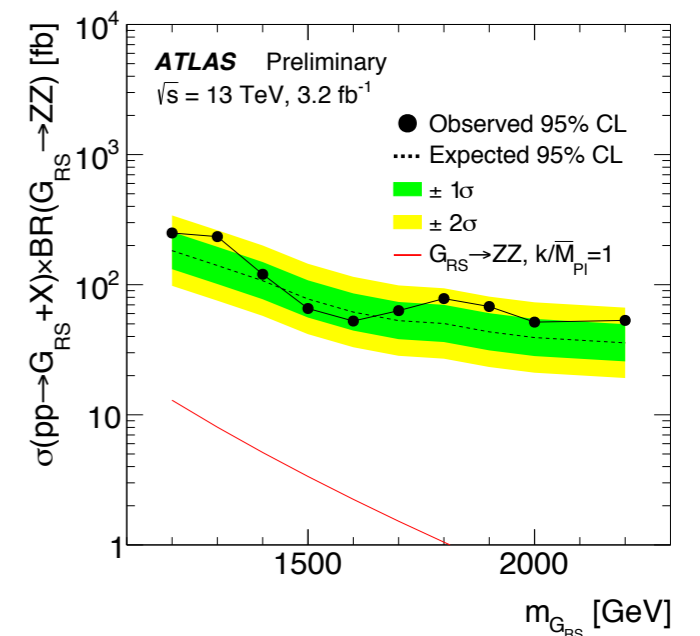
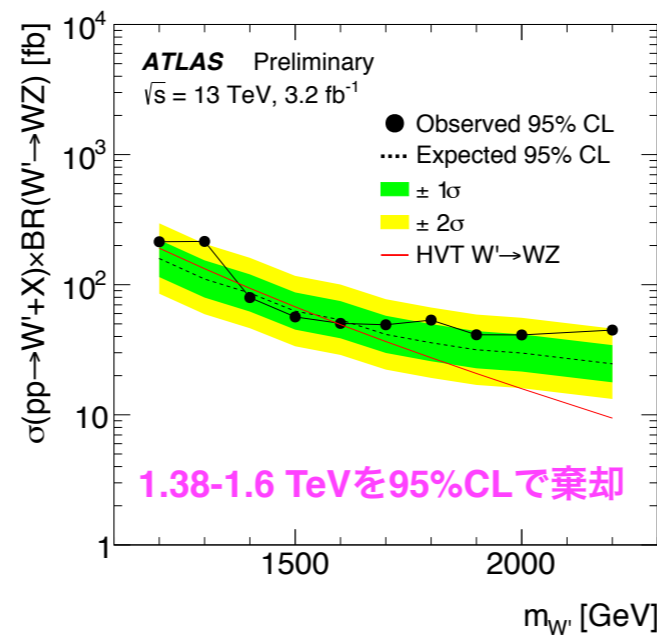
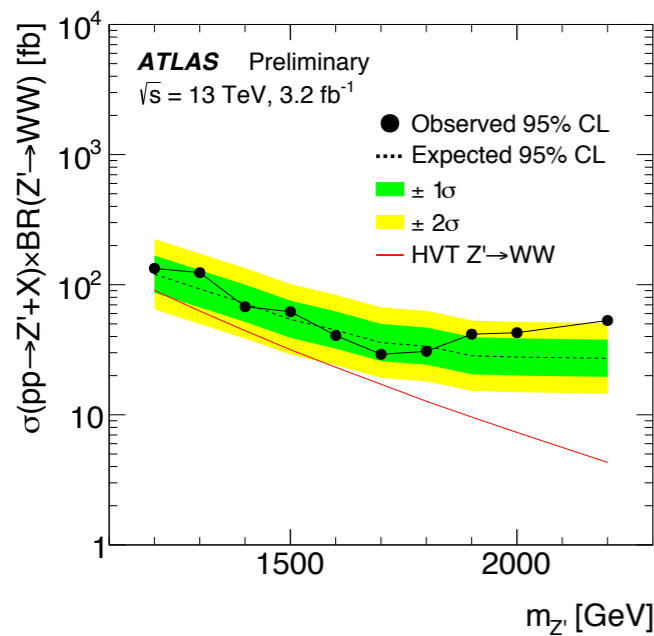
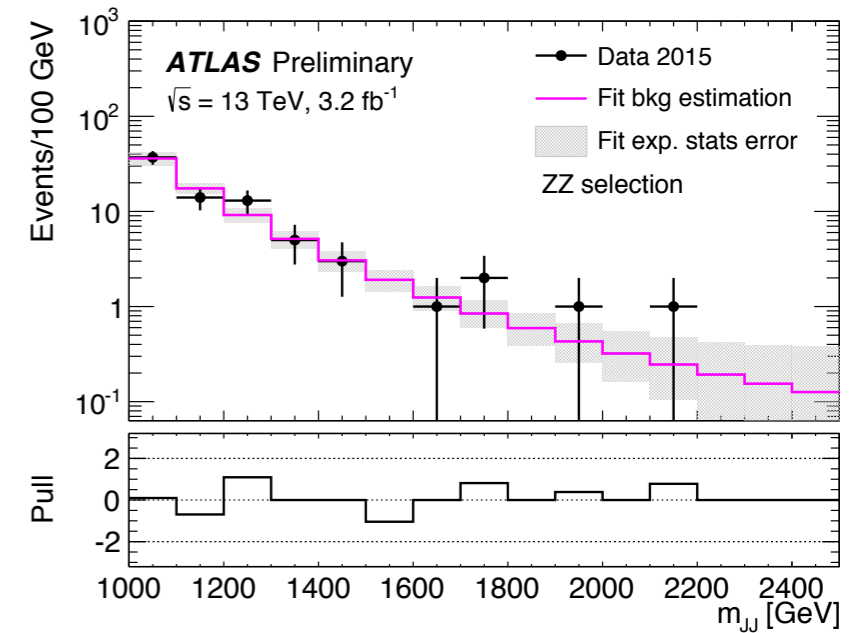
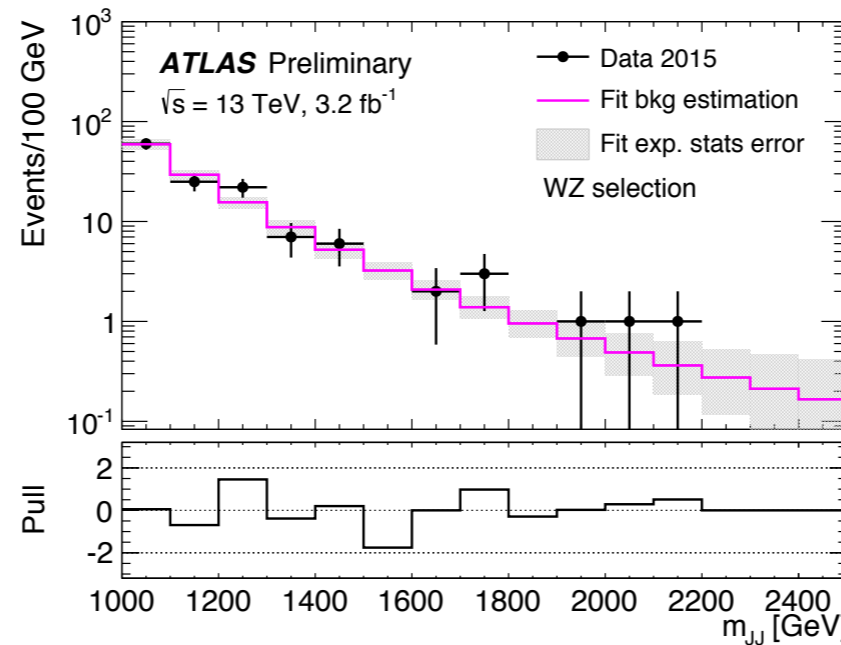
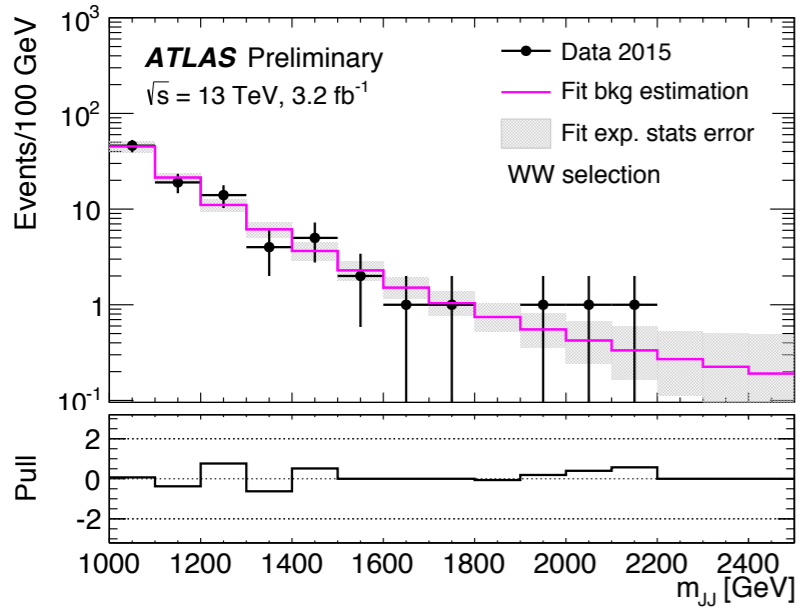




VV → qqqq (JJ)探索



ATLAS-CONF-2015-073



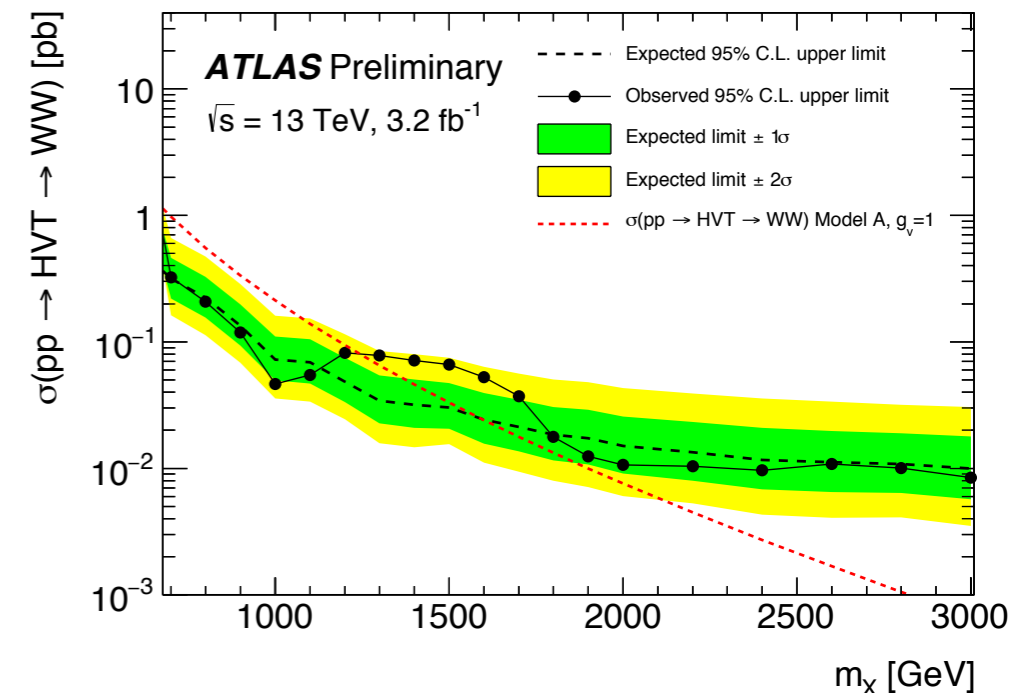
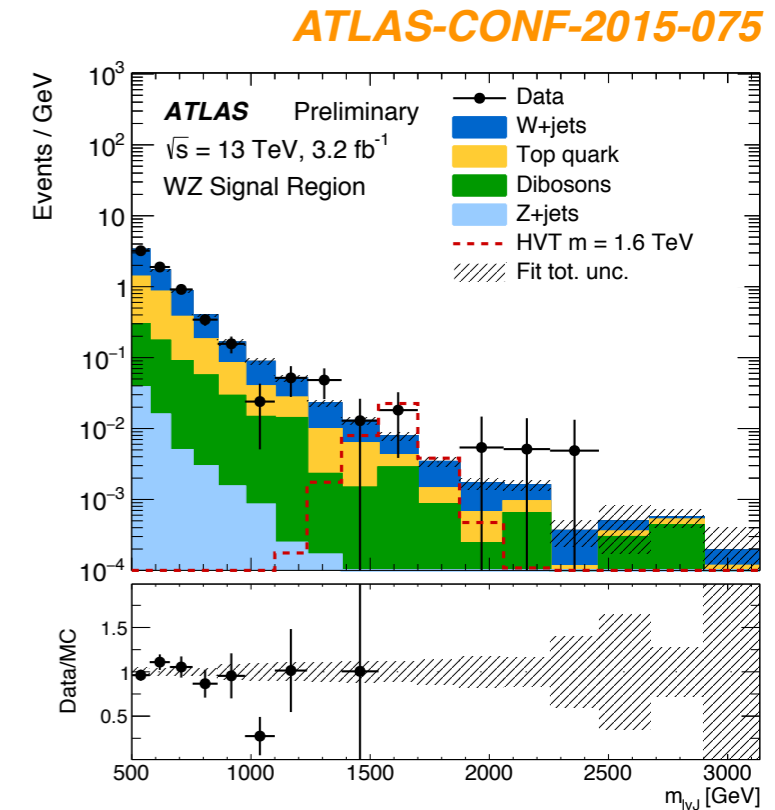
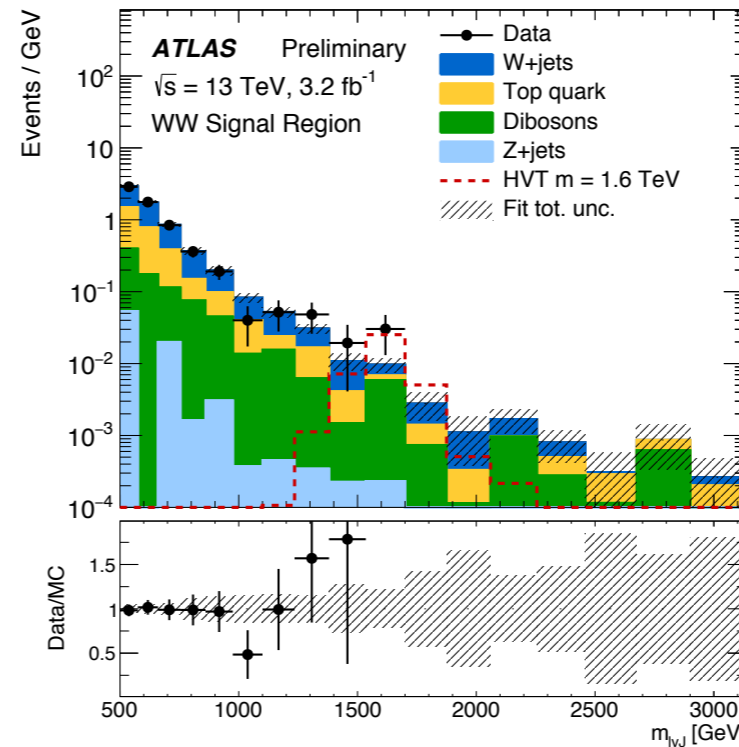
有意なピークは観測されなかった。ただし、 $m_{JJ} \sim 2 \text{ TeV}$ のシグナルは棄却されていないので、より高統計のデータで検証・追跡調査必要。



WW → lvqq (lvJ)探索



- 1 lepton+Missing E_T +large-R jetの終状態.
- Neutrinoの p_z は、Wの質量からレプトンの運動量とMissing E_T を用いて求める。
- Signal regionは、boosted-bosonのmassによってWWとWZに分類される (重複有り)。
- W+jets, ttbar BGs: MCを用いて評価。規格化は、control regionを用いてデータから。
- Z+jets, VV BGs: MCを用いて評価。
- Multijet BG: データを用いて評価。
- $m(G^*) < 1060 \text{ GeV}$ & $m(W') < 1.25 \text{ TeV}$ @95% CLで除外。

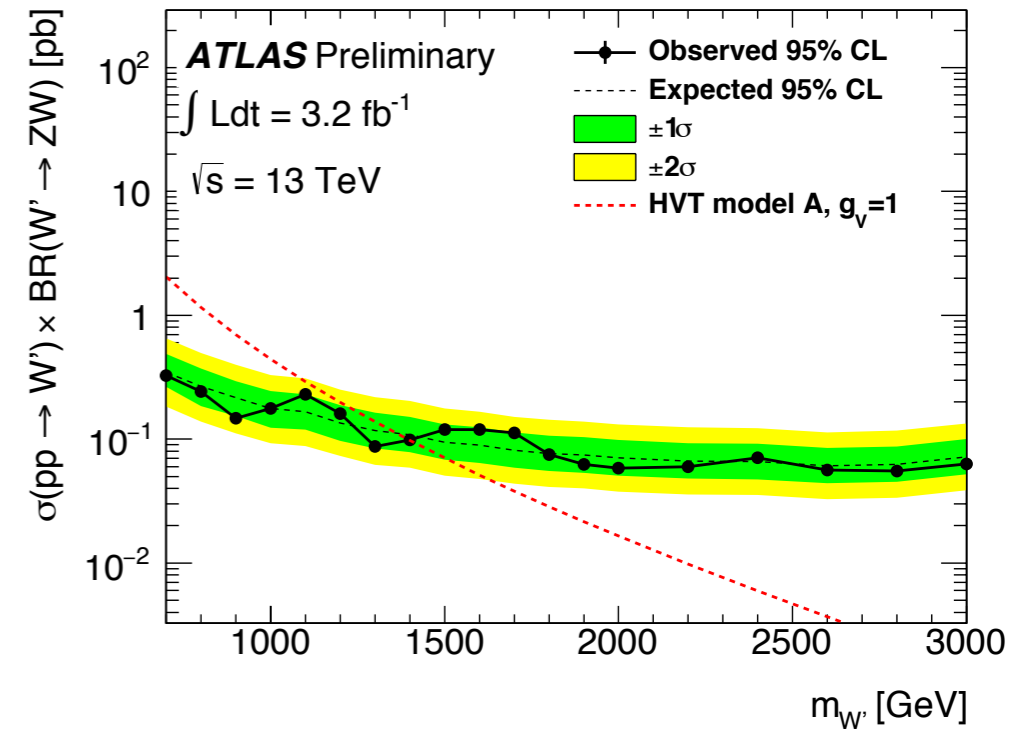
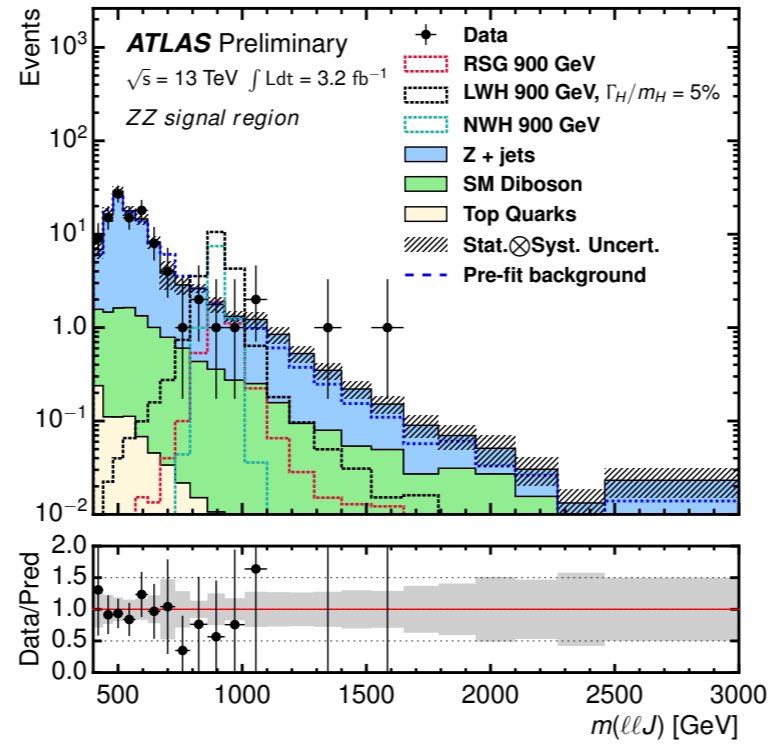
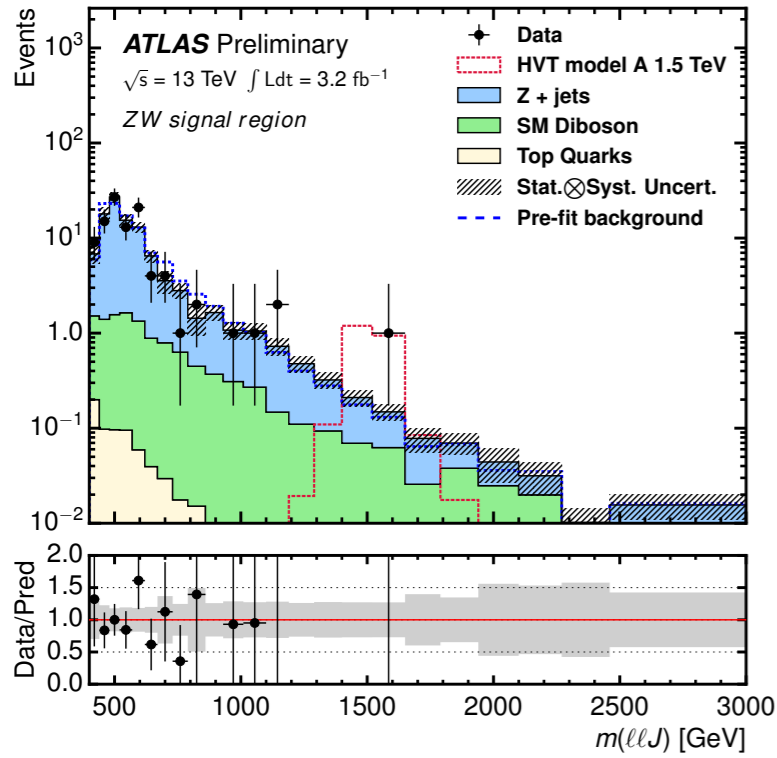




ZV → llJ 探索



ATLAS-CONF-2015-071



- 2 レプトン+large-R jetの終状態。 $88 < m_{ee} < 99 \text{ GeV}$, $66 < m_{\mu\mu} < 116 \text{ GeV}$.
- バックグラウンドは、Z+jetsが支配的。Boson taggingの条件を通過した事象で、質量域のみが m_W/m_Z の条件を満たさない事象を、コントロール領域としてZ+jets BGを評価。
- $m(G^*) < 850 \text{ GeV}$ & $m(W') < 1.4 \text{ TeV}$ @95% CLで除外。

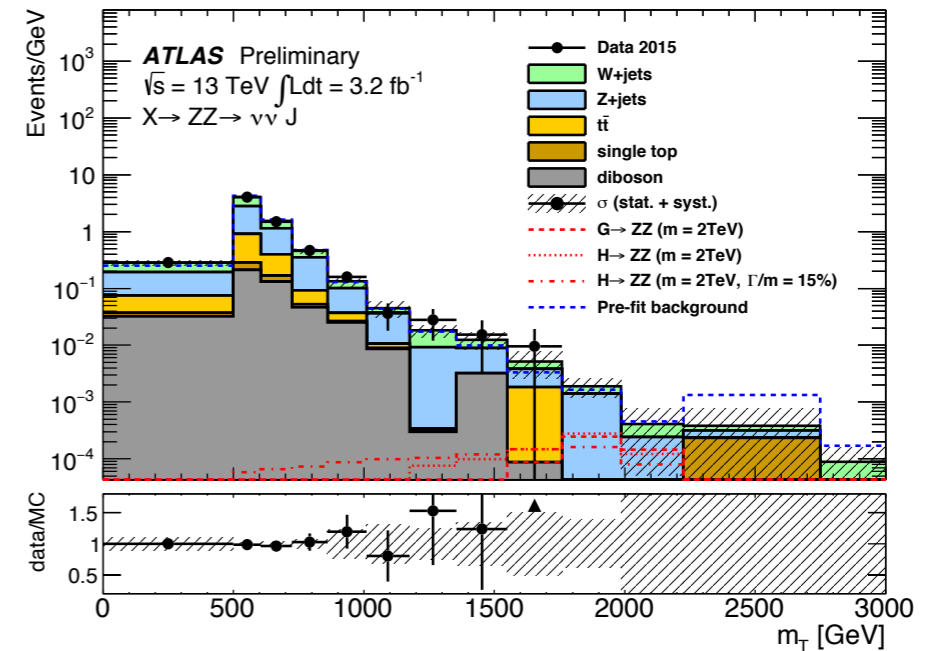
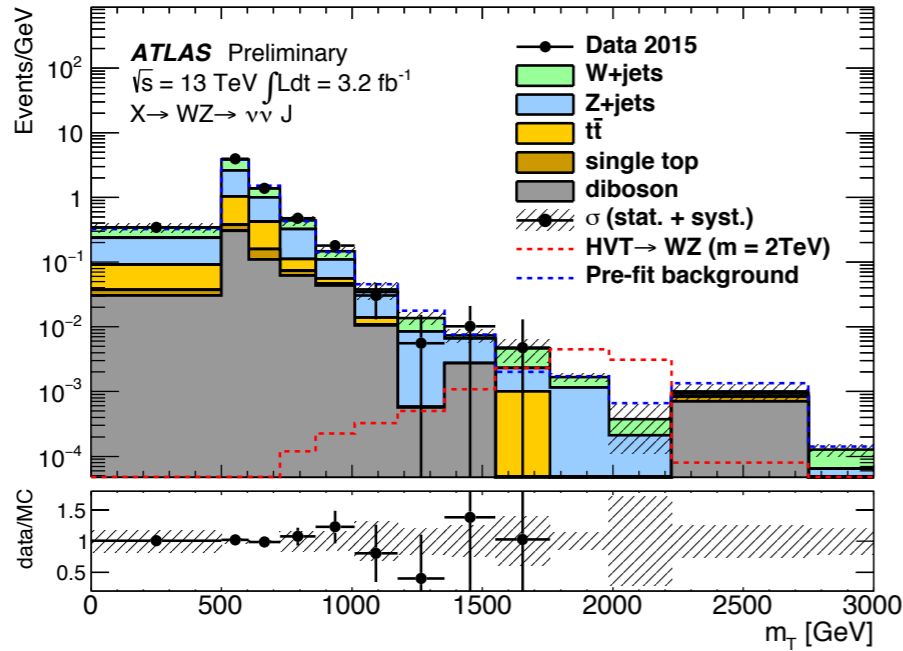
$$N_{\text{SR}}^{\text{Z+jets}}(m_i) = N_{\text{CR}}^{\text{Data}}(m_i) \times \alpha_{\text{MC}}(m_i) = N_{\text{CR}}^{\text{Data}}(m_i) \times \left(\frac{N_{\text{SR}}(m_i)}{N_{\text{CR}}(m_i)} \right)_{\text{MC}}$$



ZV → vvJ探索

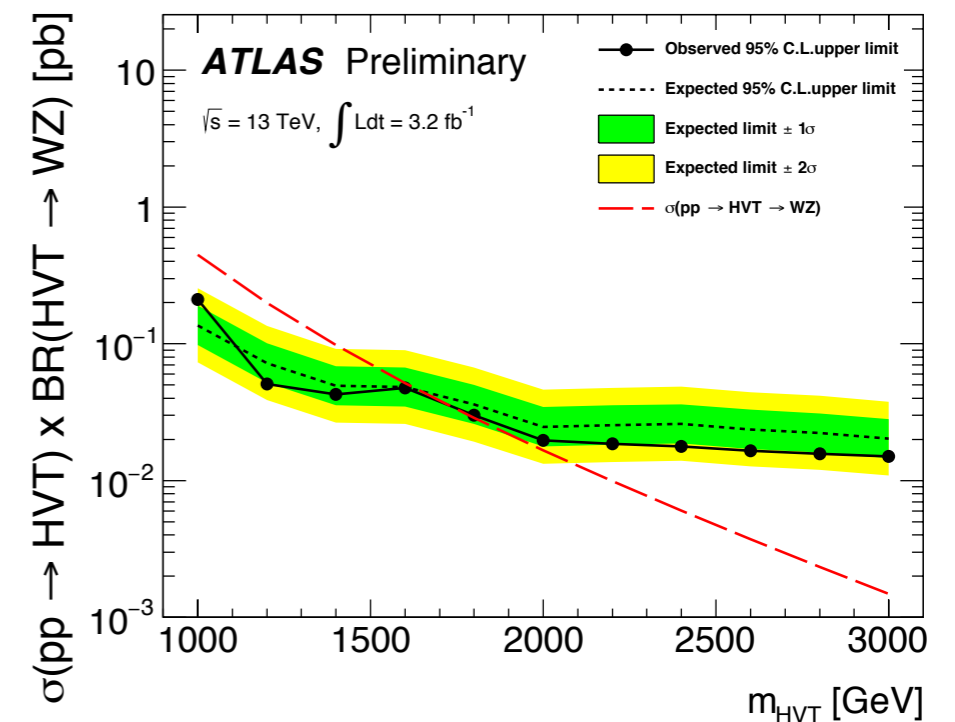


ATLAS-CONF-2015-068



$$m_T = \sqrt{(E_{T,J} + E_T^{\text{miss}})^2 - (\vec{p}_{T,J} + \vec{E}_T^{\text{miss}})^2}$$

- Run-2では、Z(→vv)Jチャンネルも考慮。Z(→vv)をMissing E_T として再構成するので、横質量 m_T を考える。
- 主要なBGは、Z+jets, W+jets, ttbar。それぞれに対応するコントロール領域を定義し、シグナル領域と共にcombined fit。
- $m(W') < 1.6 \text{ TeV} @ 95\% \text{ CL}$ で除外。

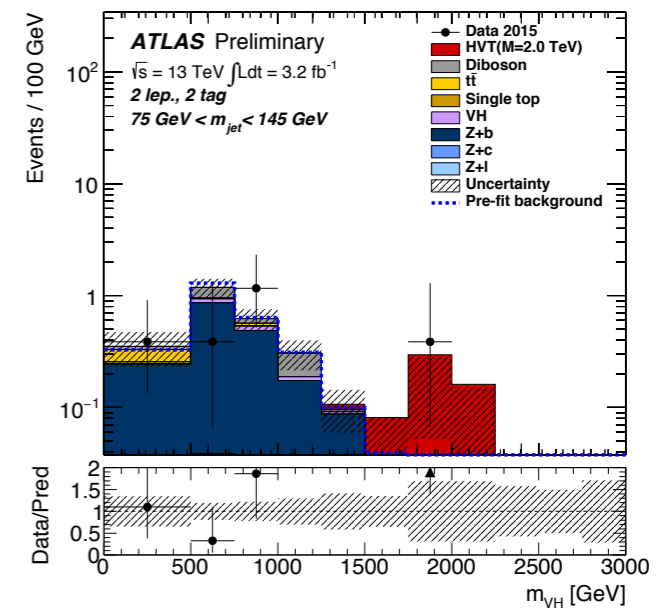
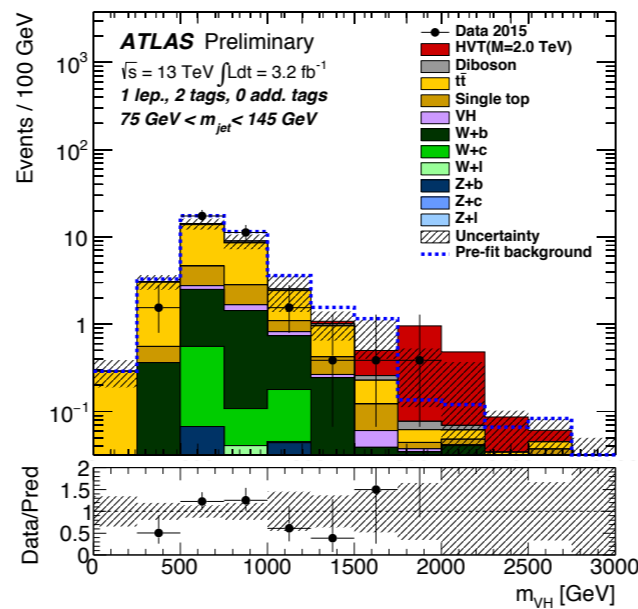
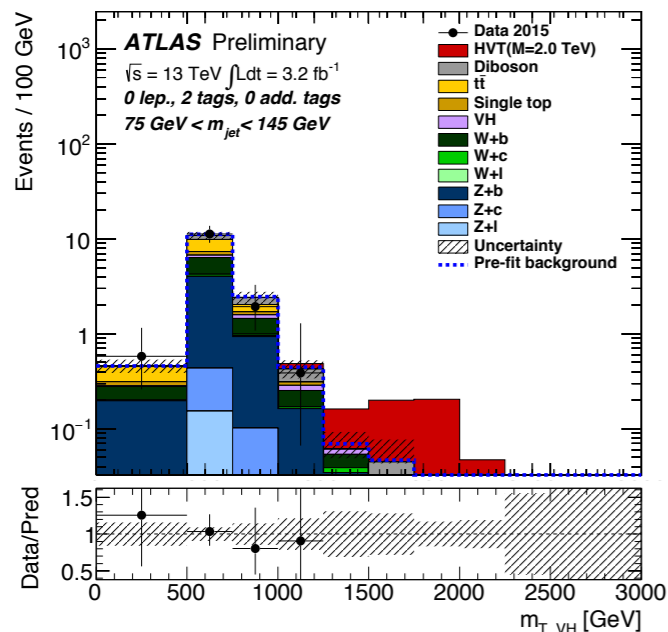
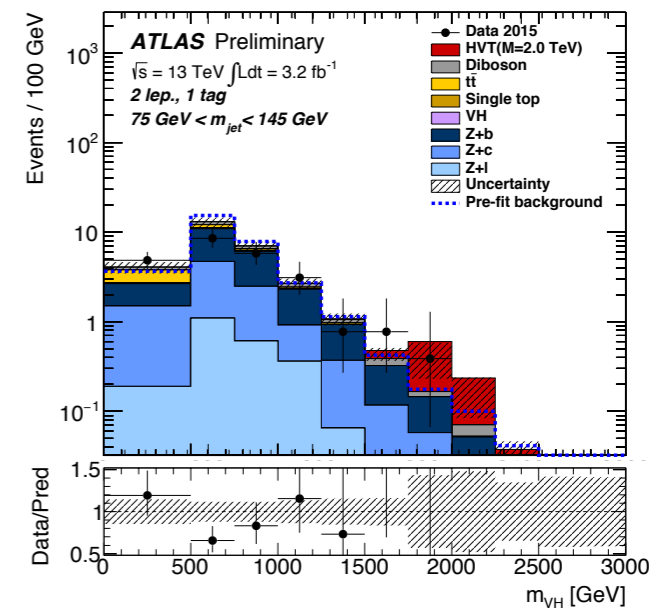
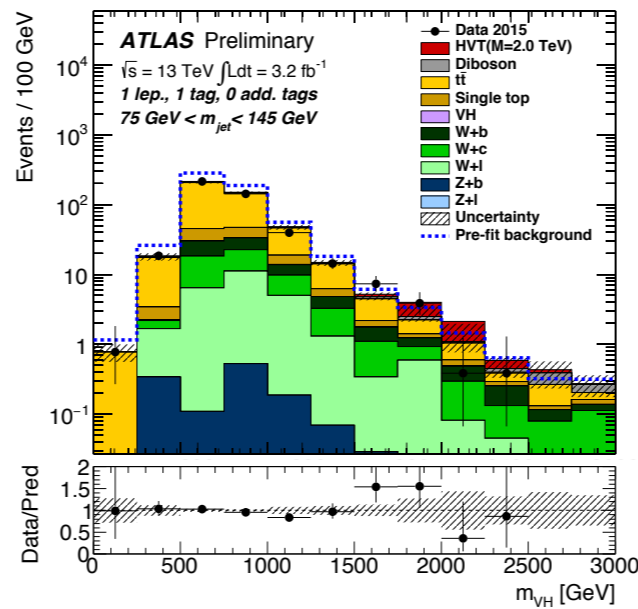
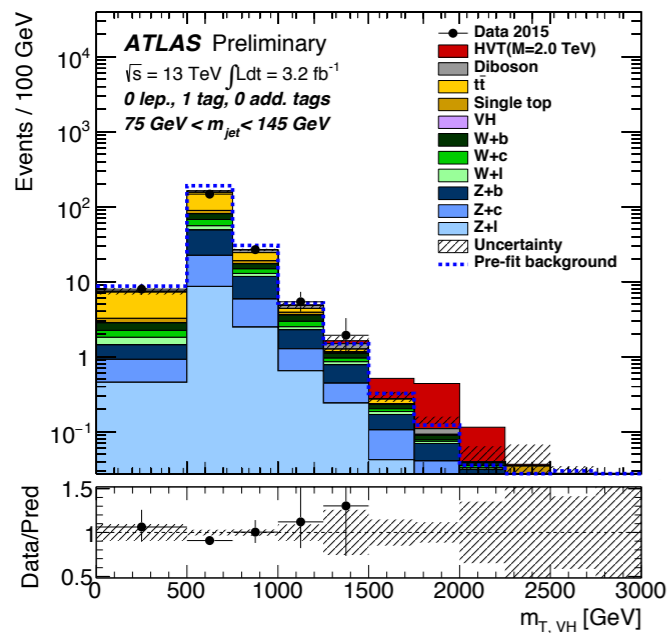




VH \rightarrow vv/lv/l+bb探索



- Higgs-taggingを用いた解析。解析手法としては、前述のチャンネルと類似。ただし、Higgs-taggingのために、R=0.2 track jetsを用いたb-tagも導入。

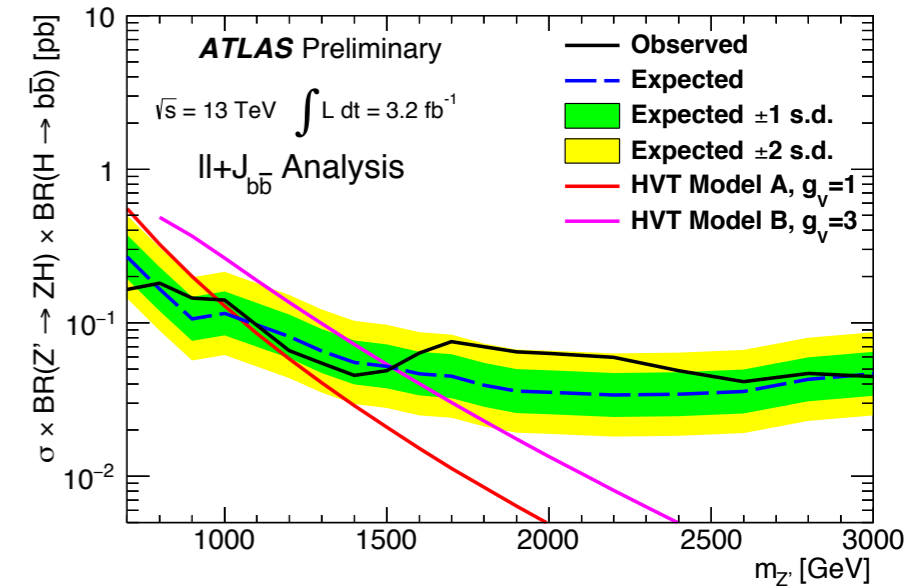
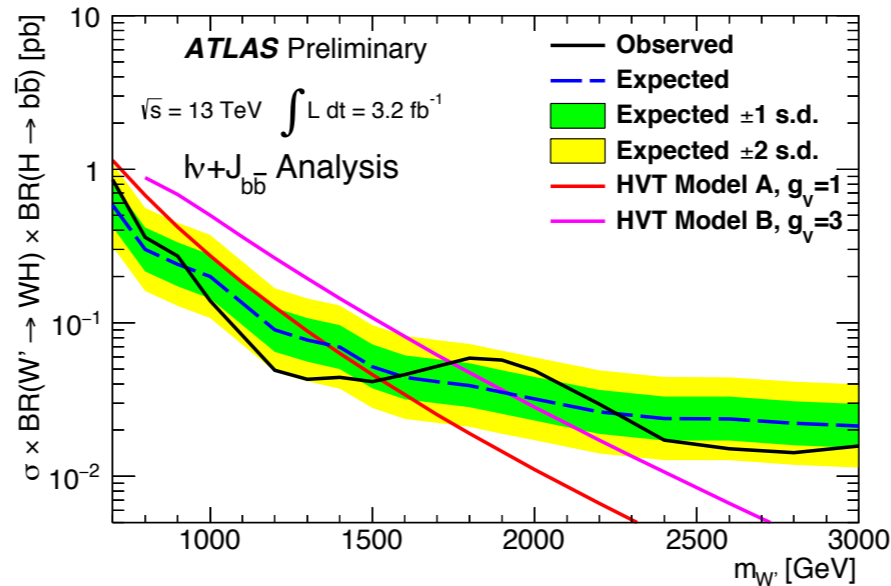
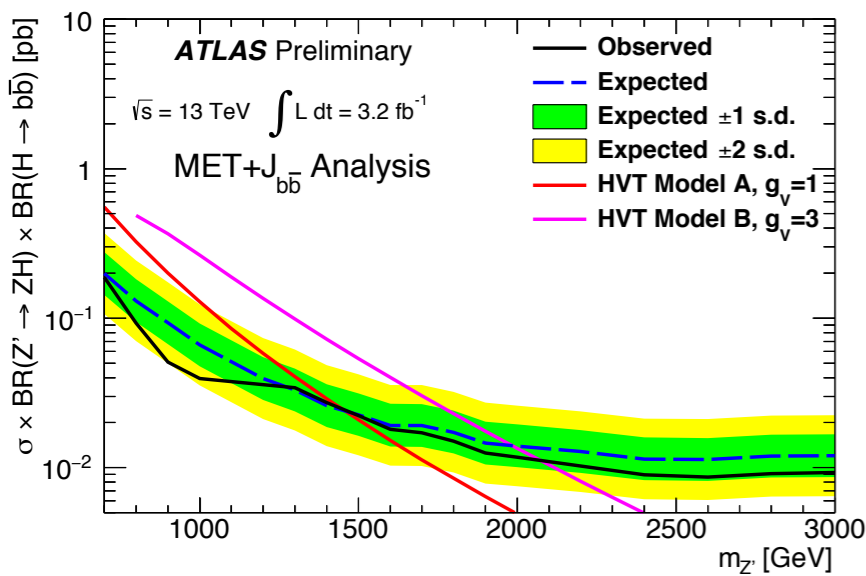




VH \rightarrow $\nu\nu/l\nu/l\bar{l}+bb$ 探索



- 0-レプトン、1-レプトン、2-レプトン全てにおいて、有意なexcessは観測されなかった。

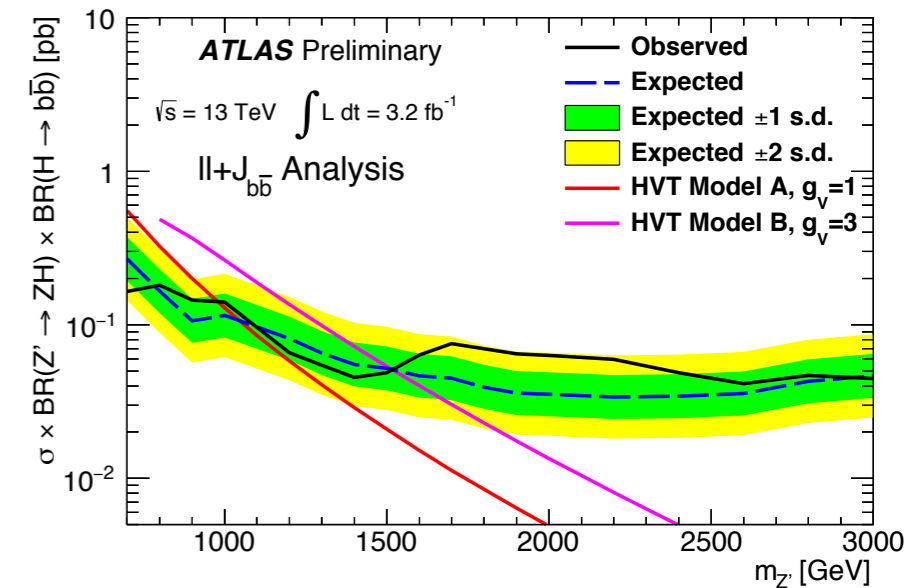
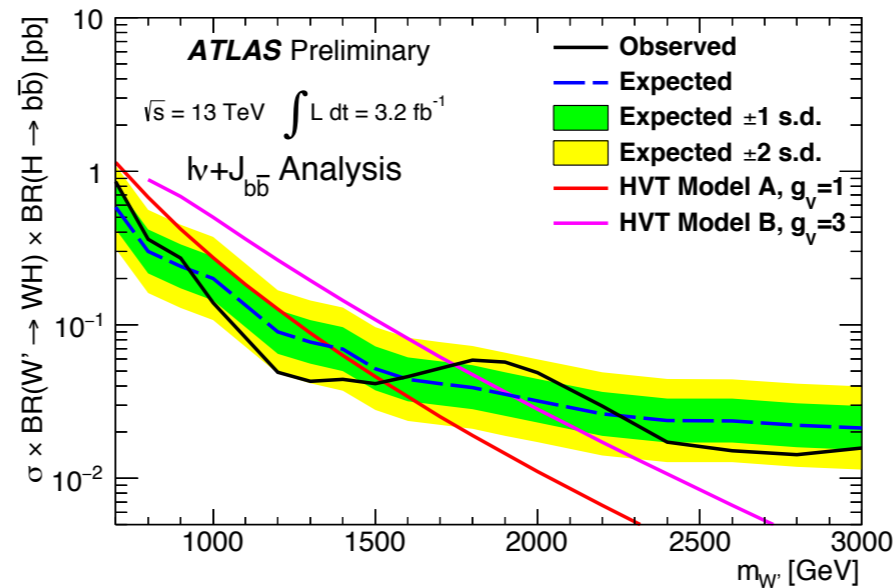
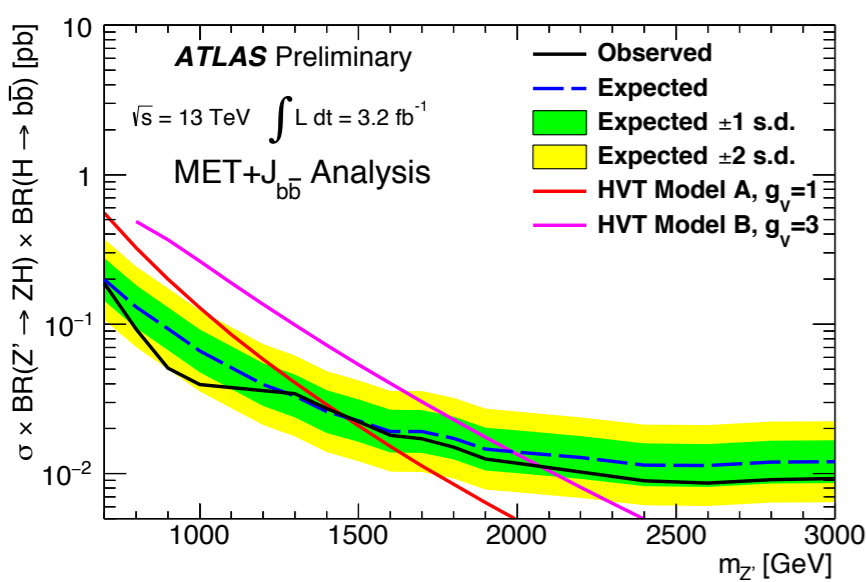




VH \rightarrow $\nu\nu/l\nu/l\bar{l}+bb$ 探索



- 0-レプトン、1-レプトン、2-レプトン全てにおいて、有意なexcessは観測されなかった。



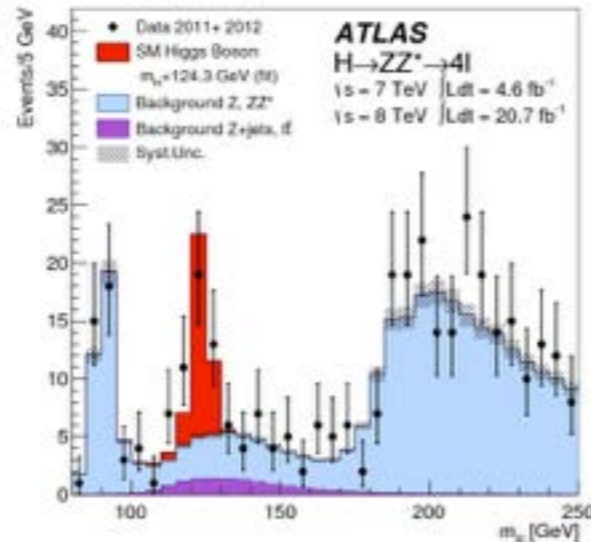
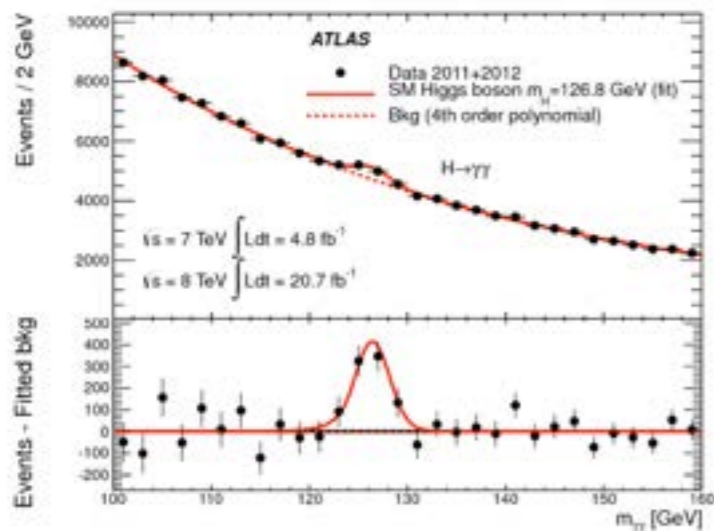
- Large-R jetsを用いたダイボソン共鳴探索では、現時点で新粒子の兆候は見られない。
- ただし、 $m_X \sim 2 \text{ TeV}$ のシグナルを棄却するには、より多くの統計を要する。
- 今年の春以降のデータを用いた追跡調査が、重要となる。

その他のダイボソン共鳴事象探索

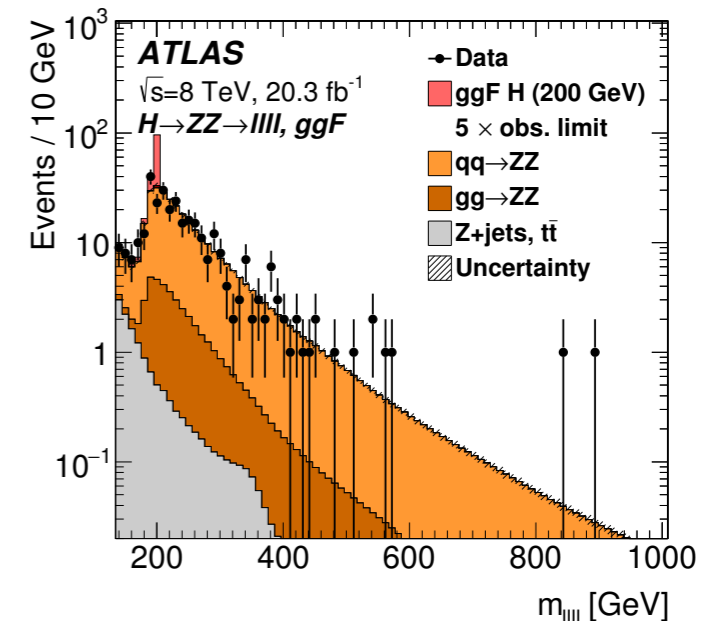
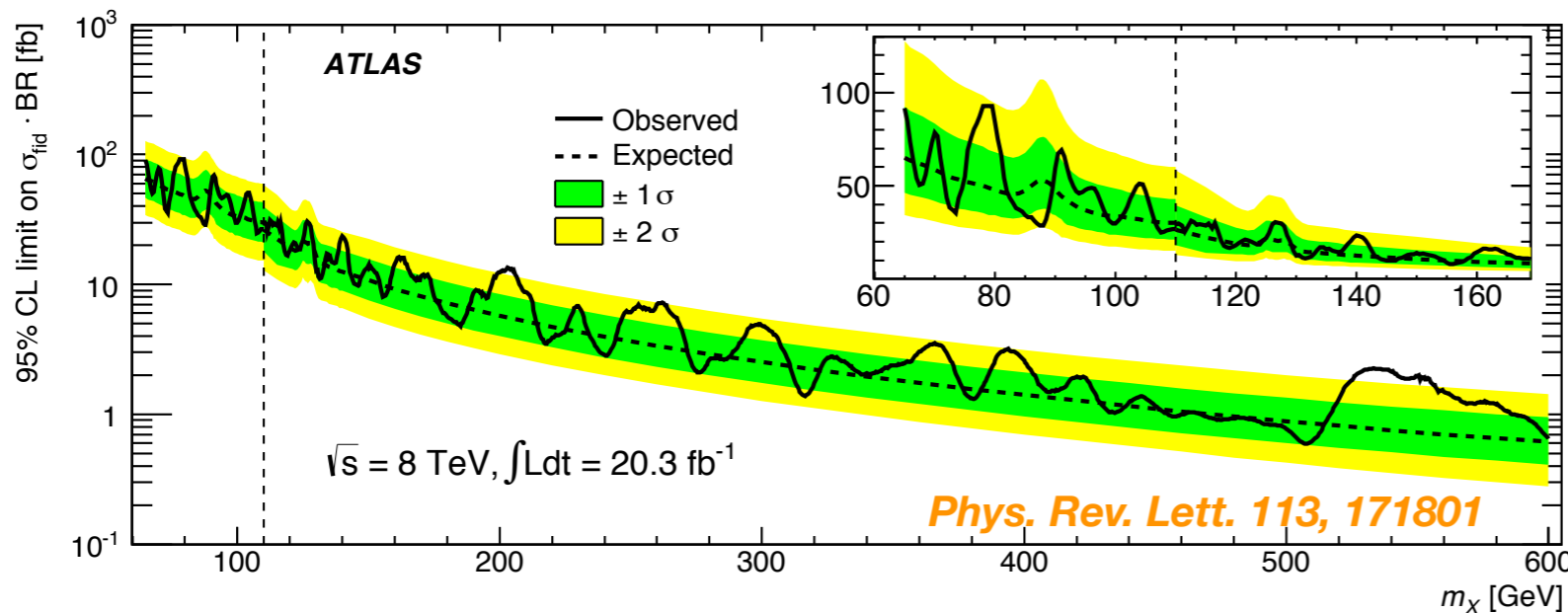
$H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ (\rightarrow 4l)$



$\Upsilon\Upsilon$, $ZZ(\rightarrow 4l)$ チャンネル



- 2012年7月に、ヒッグス粒子を発見した“Golden Channels”。
- バックグラウンドが少なく(又は精度よく評価しやすく)、新物理の兆候が見えやすい。



- Run-1で、これらのチャンネルを用いた更なる新粒子の探索も行ったが、標準理論からの有意な逸脱は、見られなかった。[Run-2ではどうか？](#)

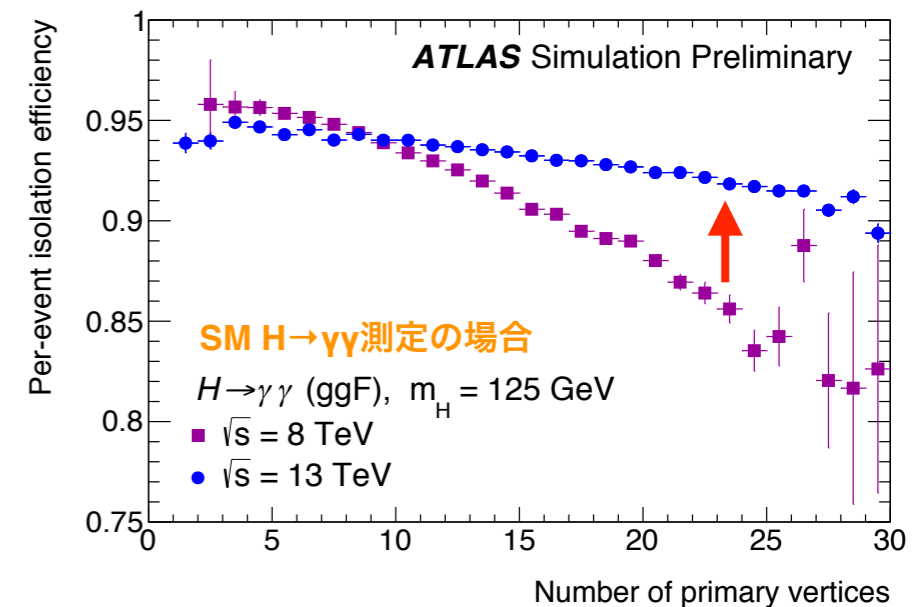
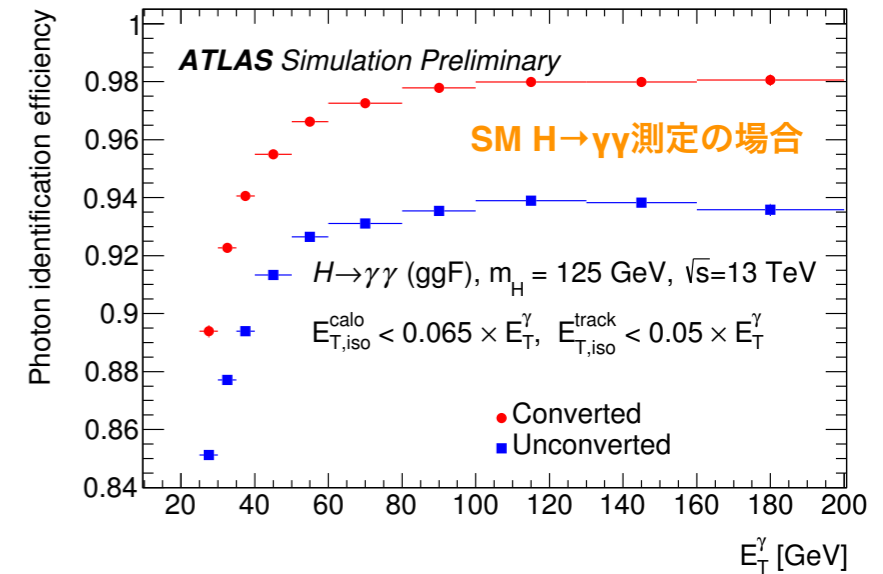


$\gamma\gamma$ 共鳴探索



**Run-2では、 2 fb^{-1} のデータで、Run-1の感度に達する (現在のデータ量は 3.2 fb^{-1})
 $m_X > 450 \text{ GeV}$ のシグナルでは、Run-1の感度を超える！**

- Diphotonトリガー($E_T > 35, 25 \text{ GeV}$)で取得されたデータを使用。
- γ のベースラインセレクション: $E_T(\gamma_1, \gamma_2) > 40, 30 \text{ GeV}$
- 質量依存のカット: $E_T(\gamma_1, \gamma_2) > 0.4 m_{\gamma\gamma}, 0.3 m_{\gamma\gamma}$
- Isolation:
 - $E_T^{\text{iso}} < 0.022 \times E_T + 2.45 \text{ GeV} \ \& \ p_T^{\text{iso}} < 0.05 \times p_T$
 - Run-2の条件下で、シグナルの有意度が最大になるように、最適化が行われた。(SM $H \rightarrow \gamma\gamma$ 測定と、 E_T^{iso} が異なる)





$\Upsilon\Upsilon$ 共鳴探索



ATLAS-CONF-2015-081

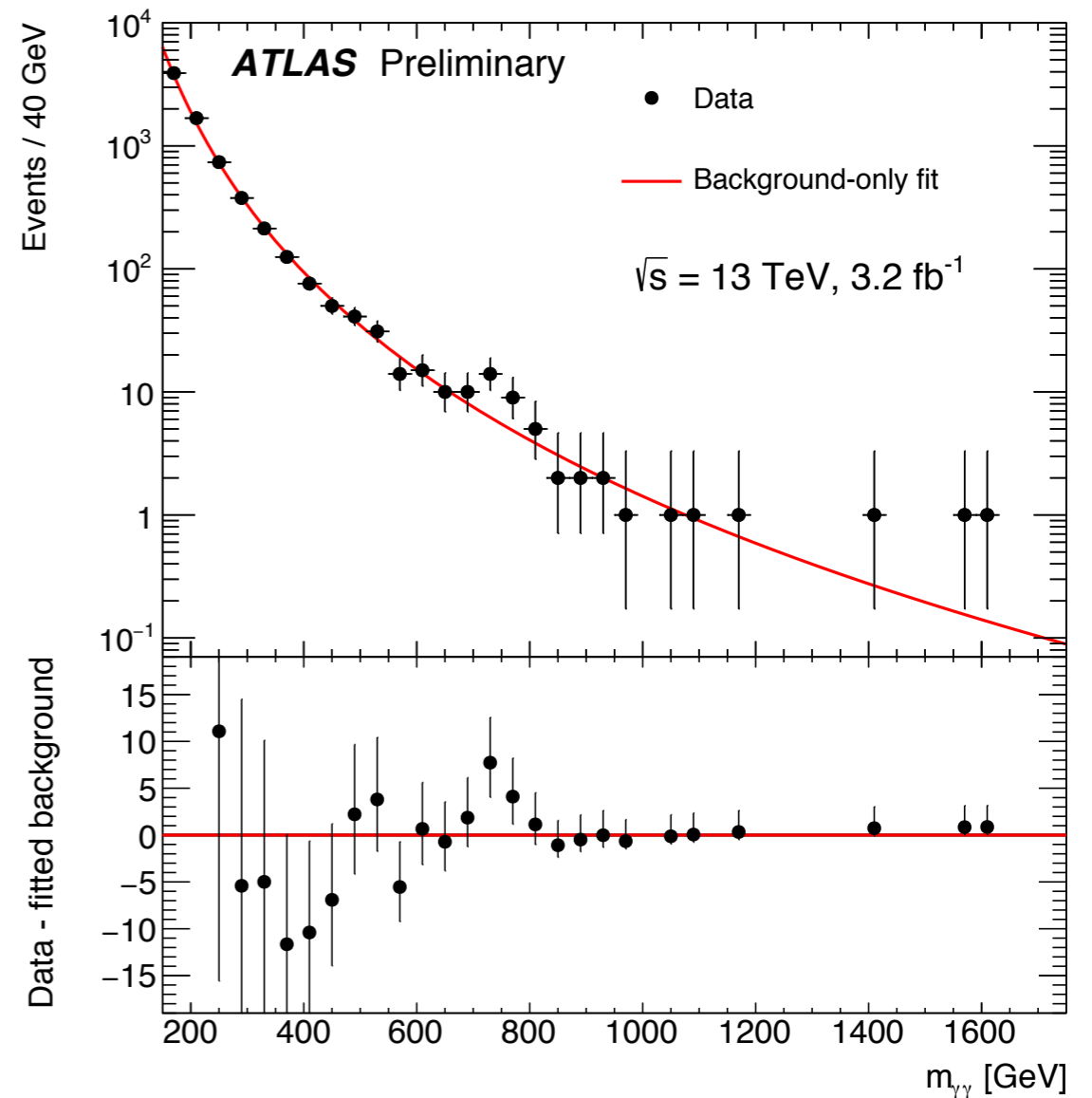
- バックグラウンドのみ存在すると仮定したフィッティング。

$$x^{-p_1} \cdot (1 - x^{1/3})^{p_2}, \quad x = m_{\gamma\gamma}/13000$$

- バックグラウンド+想定されるシグナルを用いたフィッティング（上述の式に加えて以下のシグナルの関数を使用）も考慮。

$$N \cdot \begin{cases} e^{-t^2/2} & \text{if } -\alpha_{\text{low}} \geq t \geq \alpha_{\text{high}} \\ \frac{e^{-\alpha_{\text{low}}^2/2}}{\left[\frac{\alpha_{\text{low}}}{n_{\text{low}}} \left(\frac{n_{\text{low}}}{\alpha_{\text{low}}} - \alpha_{\text{low}} - t \right) \right]^{n_{\text{low}}}} & \text{if } t < -\alpha_{\text{low}} \\ \frac{e^{-\alpha_{\text{high}}^2/2}}{\left[\frac{\alpha_{\text{high}}}{n_{\text{high}}} \left(\frac{n_{\text{high}}}{\alpha_{\text{high}}} - \alpha_{\text{high}} + t \right) \right]^{n_{\text{high}}}} & \text{if } t > \alpha_{\text{high}}, \end{cases}$$

$$t = \Delta m_X / \sigma_{\text{CB}}, \quad \Delta m_X = m_X - \mu_{\text{CB}}$$



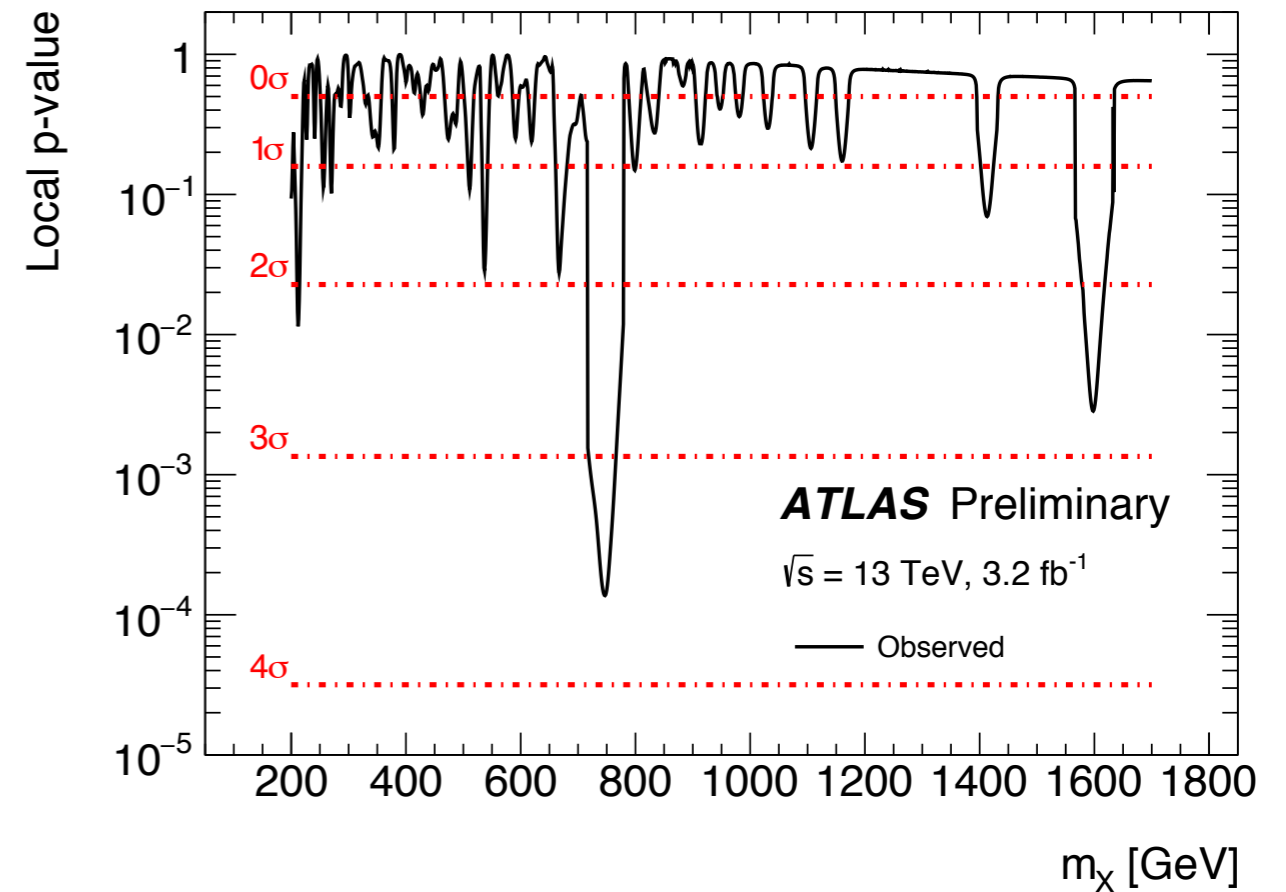
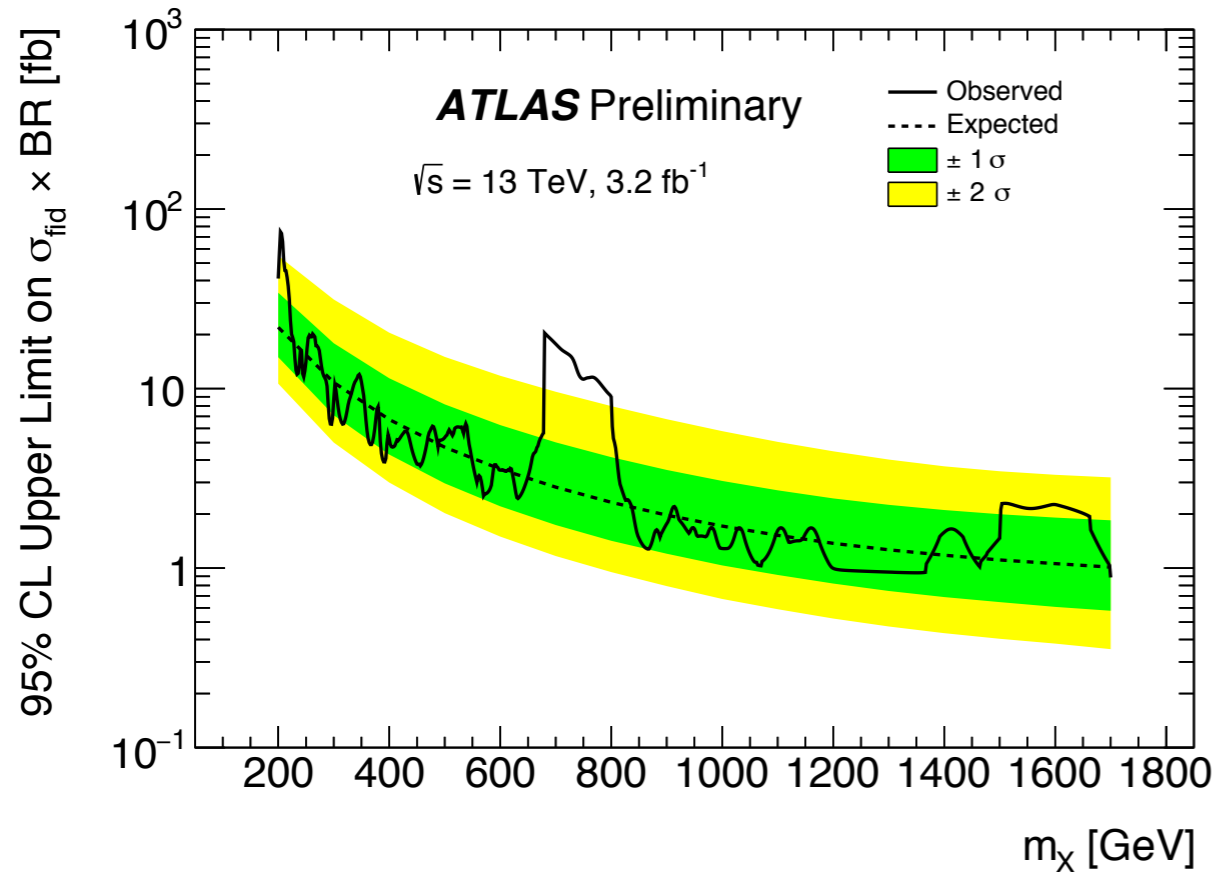
不変質量750 GeV付近に、excessが観測された



$\Upsilon\Upsilon$ 共鳴探索



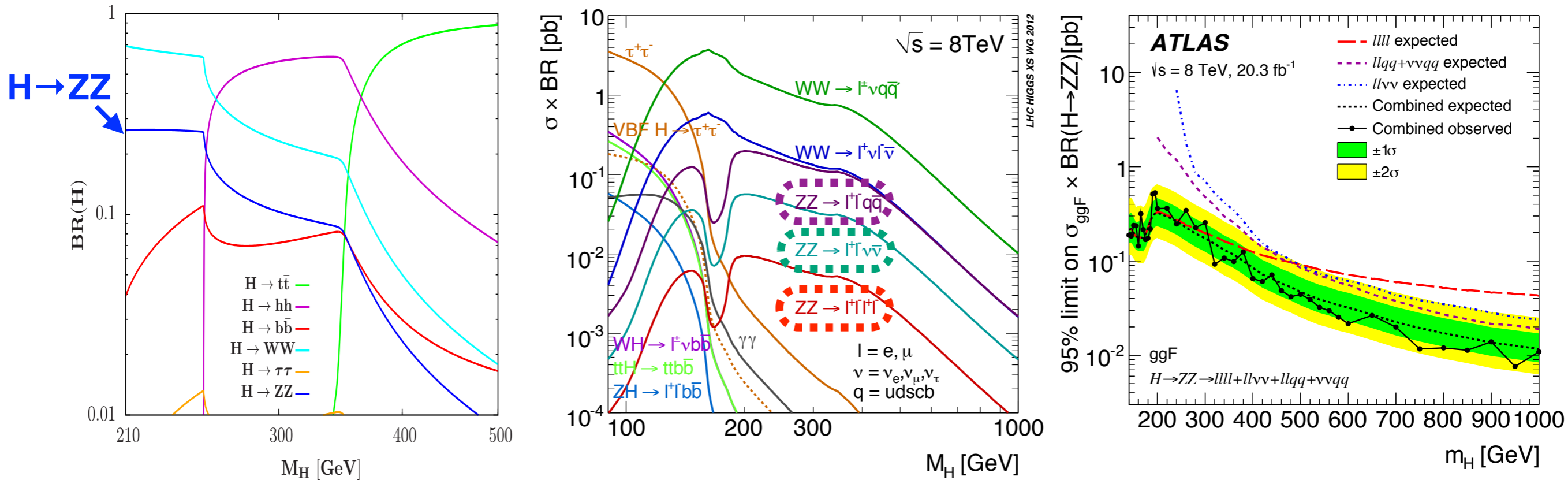
ATLAS-CONF-2015-081



- Narrow widthのシグナルを仮定すると、local 3.6 σ (global 2.0 σ)のずれ。
- シグナルの崩壊幅 $\Gamma=45 \text{ GeV}$ を仮定すると、local 3.9 σ (global 2.3 σ)に増大。
- 他のチャンネル(特にZZチャンネル)での確認と、より高統計のデータを用いた追跡調査が必要不可欠。



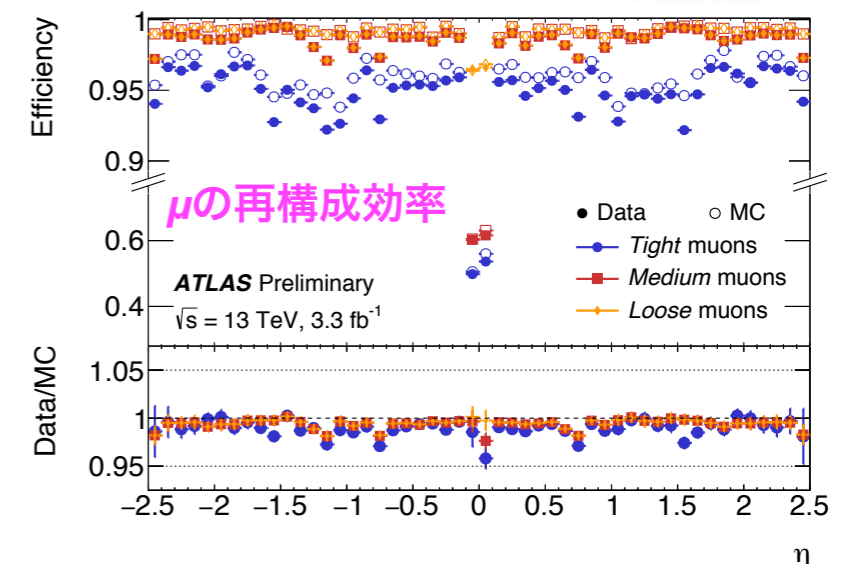
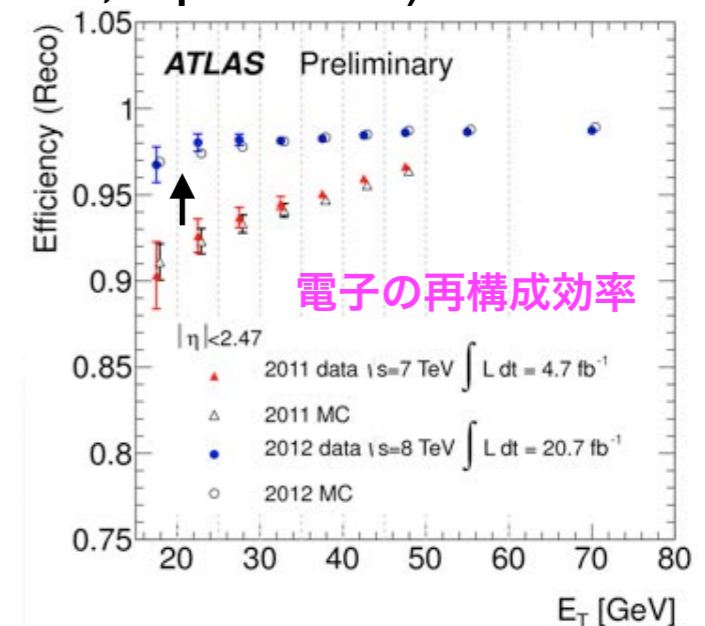
ZZ共鳴事象



- $H \rightarrow ZZ$ は、Two Higgs Doublet Model (2HDM)において、low $\tan \beta$ での重いヒッグス粒子探索に適している。
- 又、広範囲の質量域で感度があるため、新粒子探索の最重要チャンネル群の一つ。

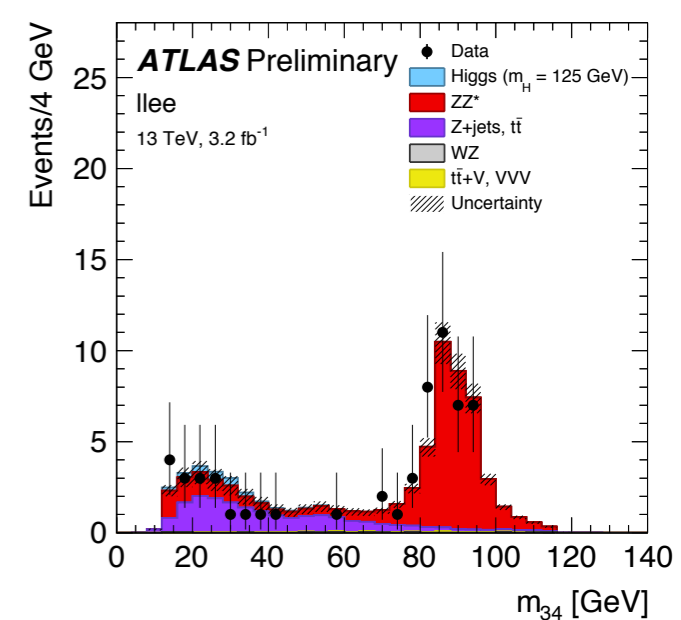
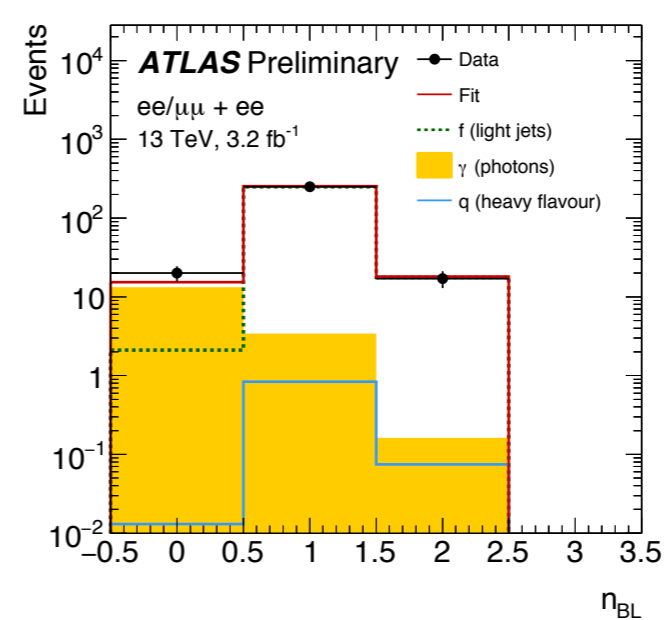
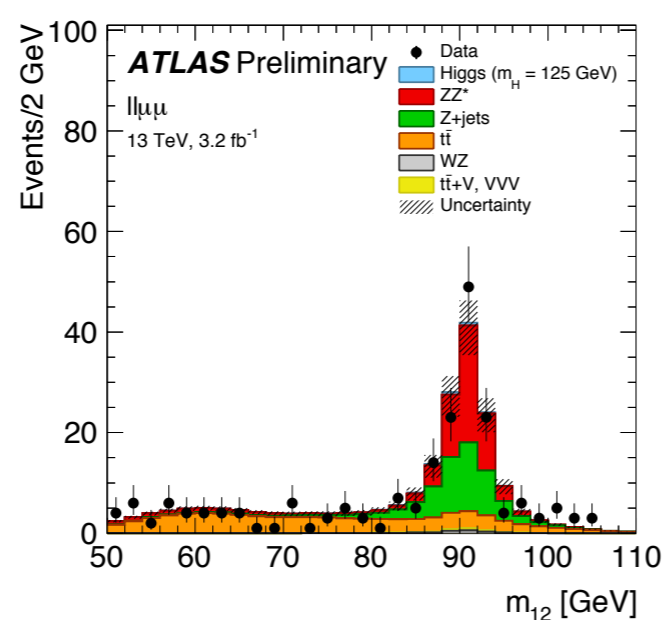
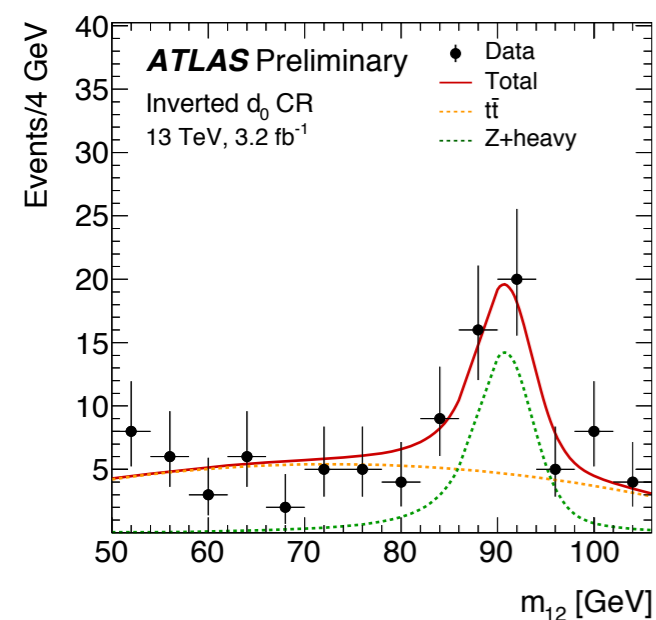
重いZZ→4l共鳴事象探索

- $200 \text{ GeV} < m_{4l} < 1 \text{ TeV}$ の質量域で探索を行った。
- シグナルアクセプタンスを稼ぐために、 p_T の閾値やレプトン同定の条件をできる限りゆるくしている (μ : $p_T > 6 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.7$; e : $E_T > 7 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.47$)。
- イベントセレクション:
 - 少なくとも4つのleptonが存在し、フレーバーとチャージの組合せを満たす。
 - $p_T^{(1)} > 25 \text{ GeV}$, $p_T^{(2)} > 15 \text{ GeV}$, $p_T^{(3)} > 10 \text{ GeV}$
 - $50 < m_{12} < 106 \text{ GeV}$, m_{34} 制限なし
 - $dR(l_i, l_j) > 0.10$ (同じフレーバーの場合),
 $dR(l_i, l_j) > 0.20$ (異なるフレーバーの場合)
 - J/ψ veto.



ZZ → 4l 共鳴事象探索

- 主要なバックグラウンド: ZZ, Z+jets, ttbar, ttbarV, VVV.
- ZZ, ttbarV, VVVは、MCから評価。ZZについては、 m_{4l} のサイドバンドから規格化を検証できる。
- ll+ $\mu\mu$: inverted-d0, e μ + $\mu\mu$, inverted-isolationの3つのコントロール領域でのフィットから、Z+jetsとttbarの寄与を評価。
- ll+ee: 3l+Xのコントロール領域から、IBLのヒット数とTRTの情報への同時フィットから、light-flavor, heavy-flavor, photonからのfake leptonの寄与を評価。



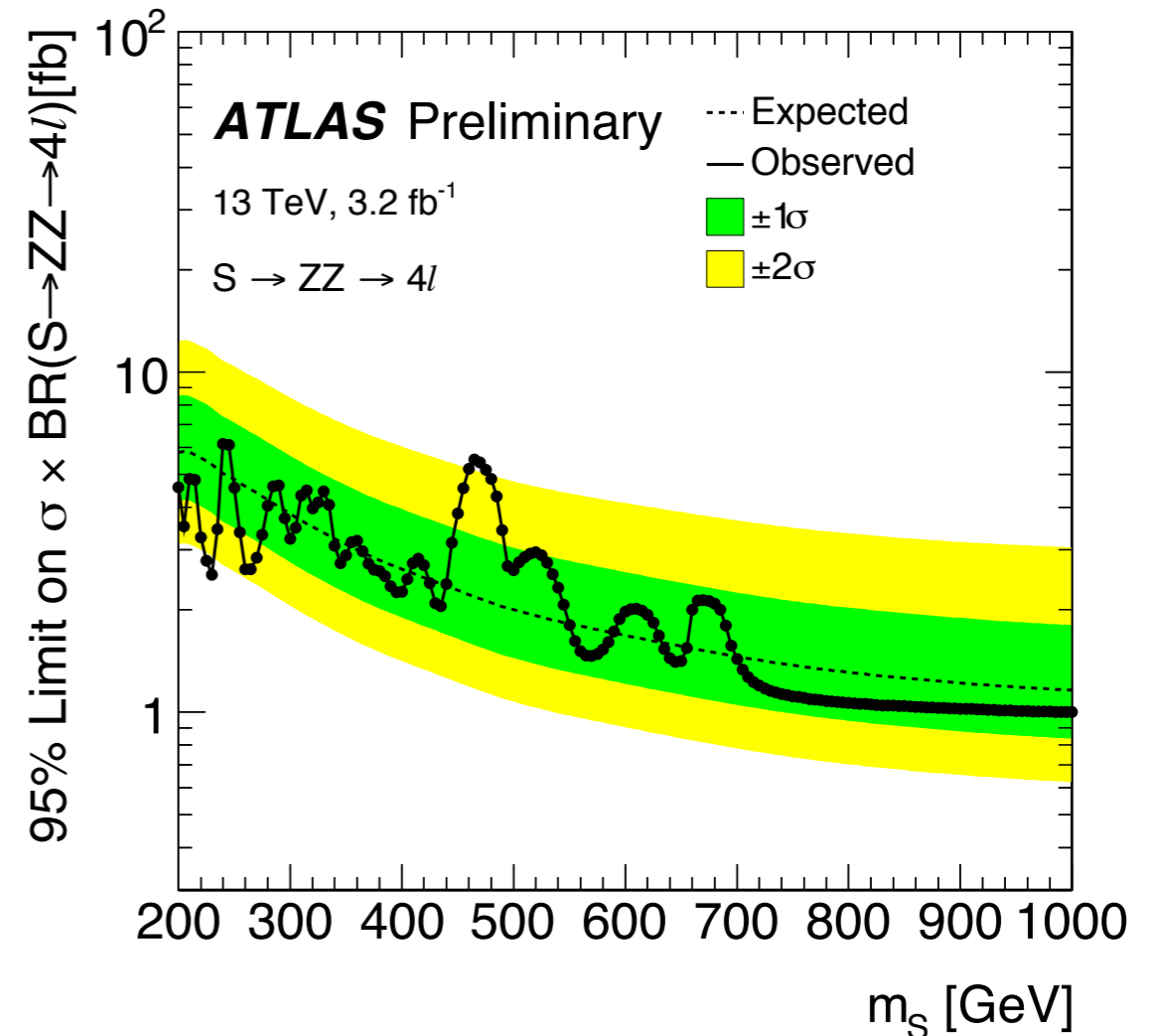
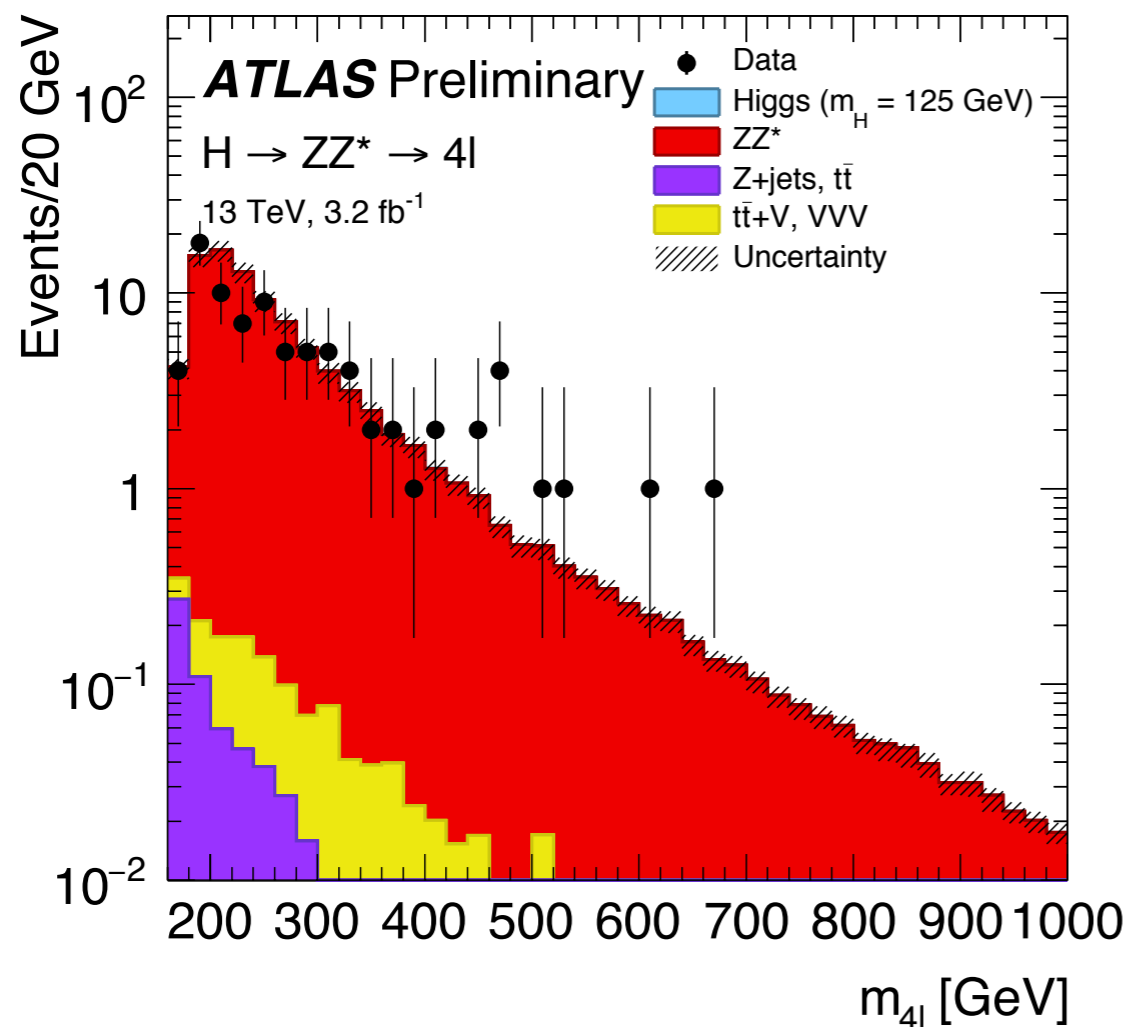


ZZ → 4l 共鳴事象探索



ATLAS-CONF-2015-059

- 4-レプトンの不変質量分布に、有意なピークは観測されなかった。
- より崩壊比の大きい、他のZZチャンネル (llvv, llqq, vvqq)の解析も進行中。
- 又、より高統計のデータを用いた調査も重要。





まとめ



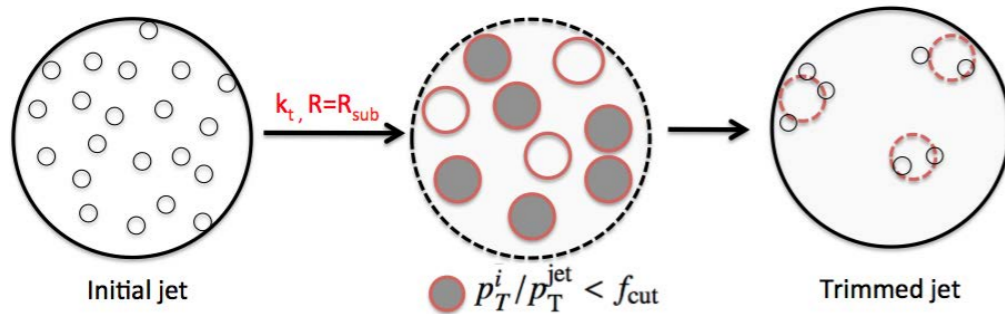
- **ダイボソン共鳴事象は、標準理論を超えた物理を探索する上で、非常に重要なチャンネルである。**
- 2015年に取得した全データ (LHC Run-2 データ)を用いたダイボソン共鳴事象の探索について、発表した。
- **Run-1で存在した、JJチャンネルでの $m_{JJ} \sim 2$ TeVの逸脱が、Run-2では観測されなかった。**
- **一方、光子対の共鳴事象では、不変質量約750 GeVに若干の逸脱が見られた。**
- 他のチャンネル (特に $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$)で、同様の共鳴が見られるかを確認することが、急務である。現在、解析を進めている。
- 又、本年の春以降に取得されるより高統計のデータを用いて、引き続き探索を続けていく。



backups



Trimming



- Grooming手法の中で (trimming, pruning, split-filtering)、trimmingが最もBG rejectionとpileupに対する安定性が優れている。

n点エネルギー相関

$$\begin{aligned}
 E_{CF0}(\beta) &= 1, & e_2^{(\beta)} &= \frac{E_{CF2}(\beta)}{E_{CF1}(\beta)^2}, \\
 E_{CF1}(\beta) &= \sum_{i \in J} p_{T_i}, & e_3^{(\beta)} &= \frac{E_{CF3}(\beta)}{E_{CF1}(\beta)^3}, \\
 E_{CF2}(\beta) &= \sum_{i < j \in J} p_{T_i} p_{T_j} (\Delta R_{ij})^\beta, \\
 E_{CF3}(\beta) &= \sum_{i < j < k \in J} p_{T_i} p_{T_j} p_{T_k} (\Delta R_{ij} \Delta R_{ik} \Delta R_{jk})^\beta,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_2^{(\beta)} &= \frac{e_3^{(\beta)}}{(e_2^{(\beta)})^2}, \\
 D_2^{(\beta)} &= \frac{e_3^{(\beta)}}{(e_2^{(\beta)})^3}.
 \end{aligned}$$

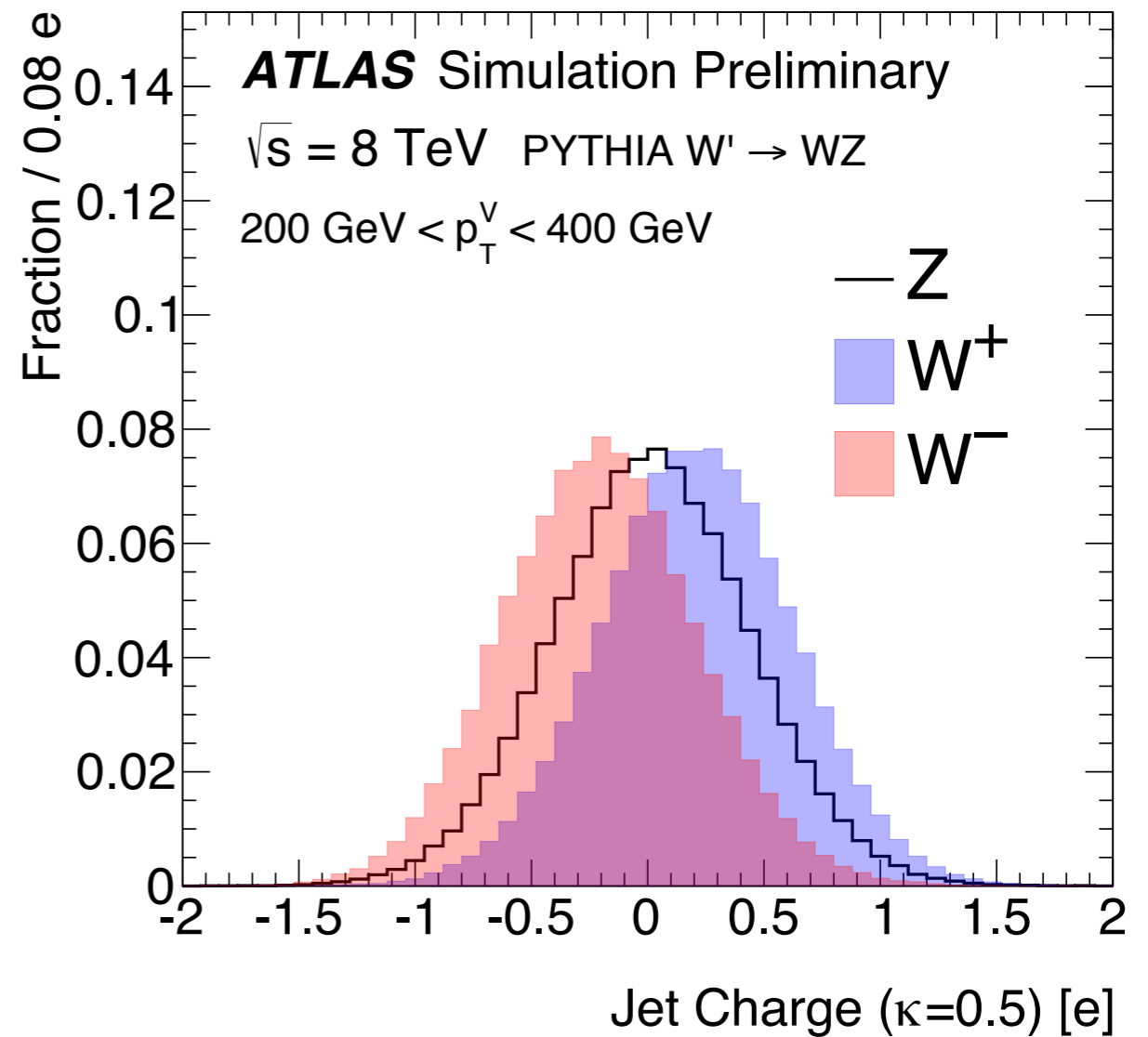
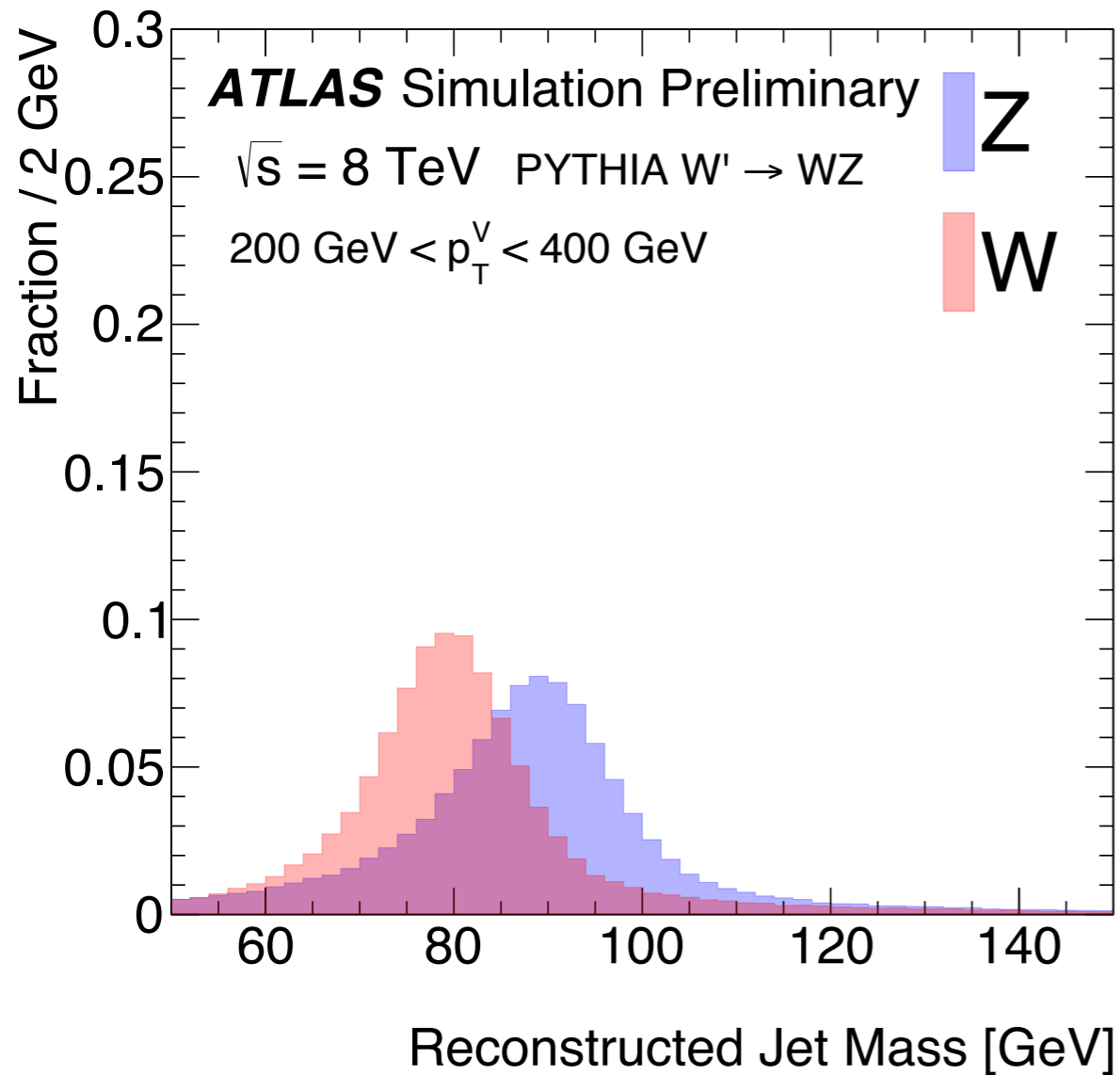
N-subjettiness

$$\begin{aligned}
 \tau_0(\beta) &= \sum_{i \in J} p_{T_i} \Delta R^\beta, \\
 \tau_1(\beta) &= \frac{1}{\tau_0(\beta)} \sum_{i \in J} p_{T_i} \Delta R_{a_1, i}^\beta, \\
 \tau_2(\beta) &= \frac{1}{\tau_0(\beta)} \sum_{i \in J} p_{T_i} \min(\Delta R_{a_1, i}^\beta, \Delta R_{a_2, i}^\beta),
 \end{aligned}$$

$$\tau_{21} = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad \tau_{21}^{\text{wta}} = \frac{\tau_2^{\text{wta}}}{\tau_1^{\text{wta}}}.$$



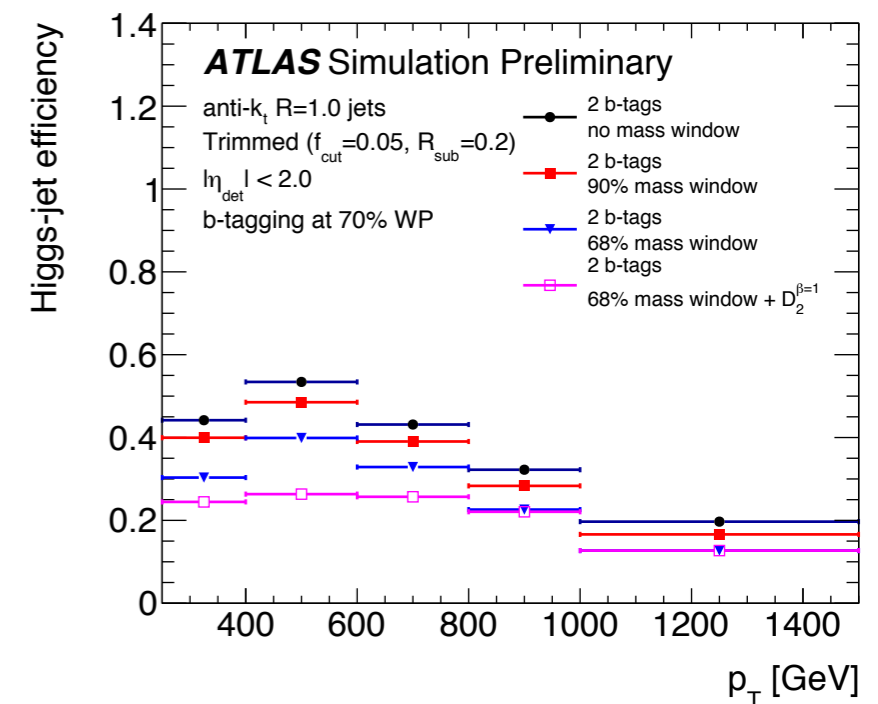
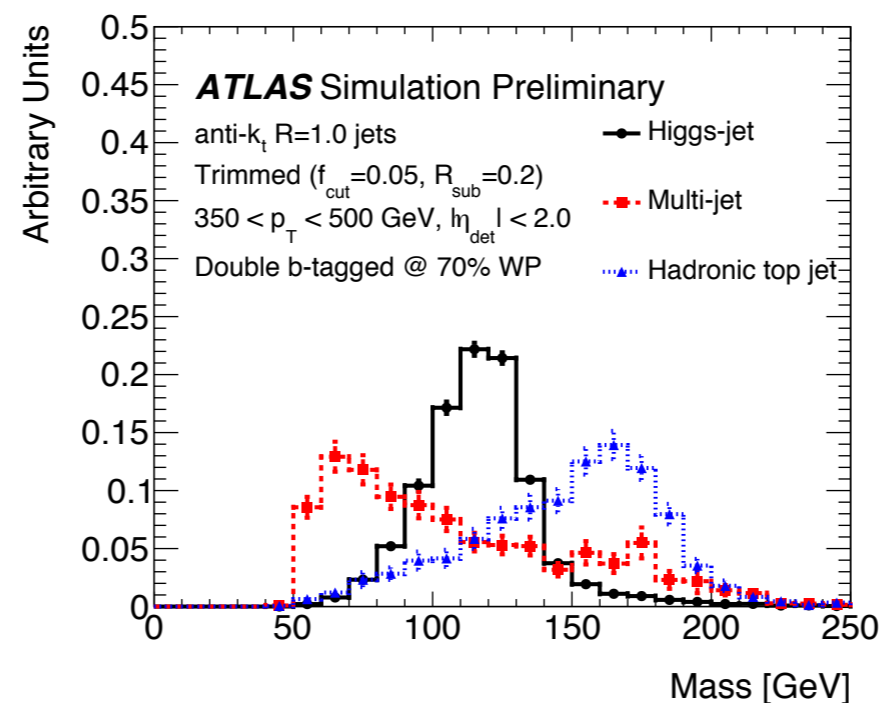
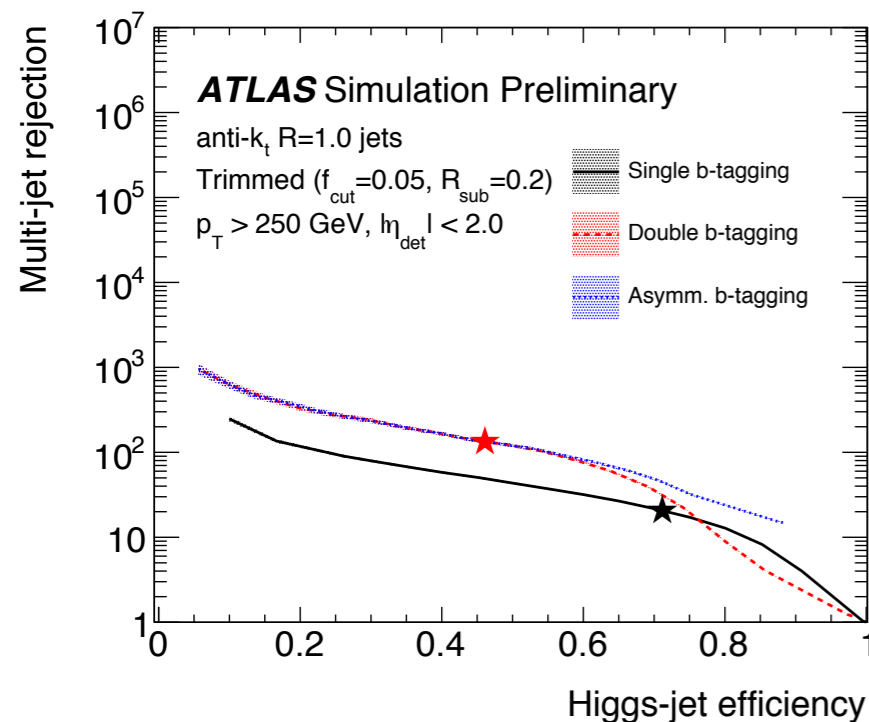
W/Z Discrimination



H → b \bar{b} Tagging



- W/Z-tagging同様、anti-k_t R=1.0を用いてjet finding.
- H → b \bar{b} 同定のため、track jet R=0.2を用いて、double b-tag (現在70% working pointのみ使用).
- C₂, D₂, τ_{21}^{wta} の中で、D₂がBG rejectionが最も良い。
- b-hardronからの μ がいた場合には、jetのfour vectorに加える。





JJ探索



m [TeV]	Γ_{HVT} [GeV]	$W' \rightarrow WZ$ $\sigma \times \text{BR}$ [fb]	$Z' \rightarrow WW$ $\sigma \times \text{BR}$ [fb]	Γ_{GRS} [GeV]	$G_{RS} \rightarrow WW$ $\sigma \times \text{BR}$ [fb]	$G_{RS} \rightarrow ZZ$ $\sigma \times \text{BR}$ [fb]
1.3	33.3	62.7	28.7	76	7.2	3.9
1.6	40.9	23.3	10.6	96	2.0	1.1
2.0	51.0	7.6	3.35	123	0.47	0.25

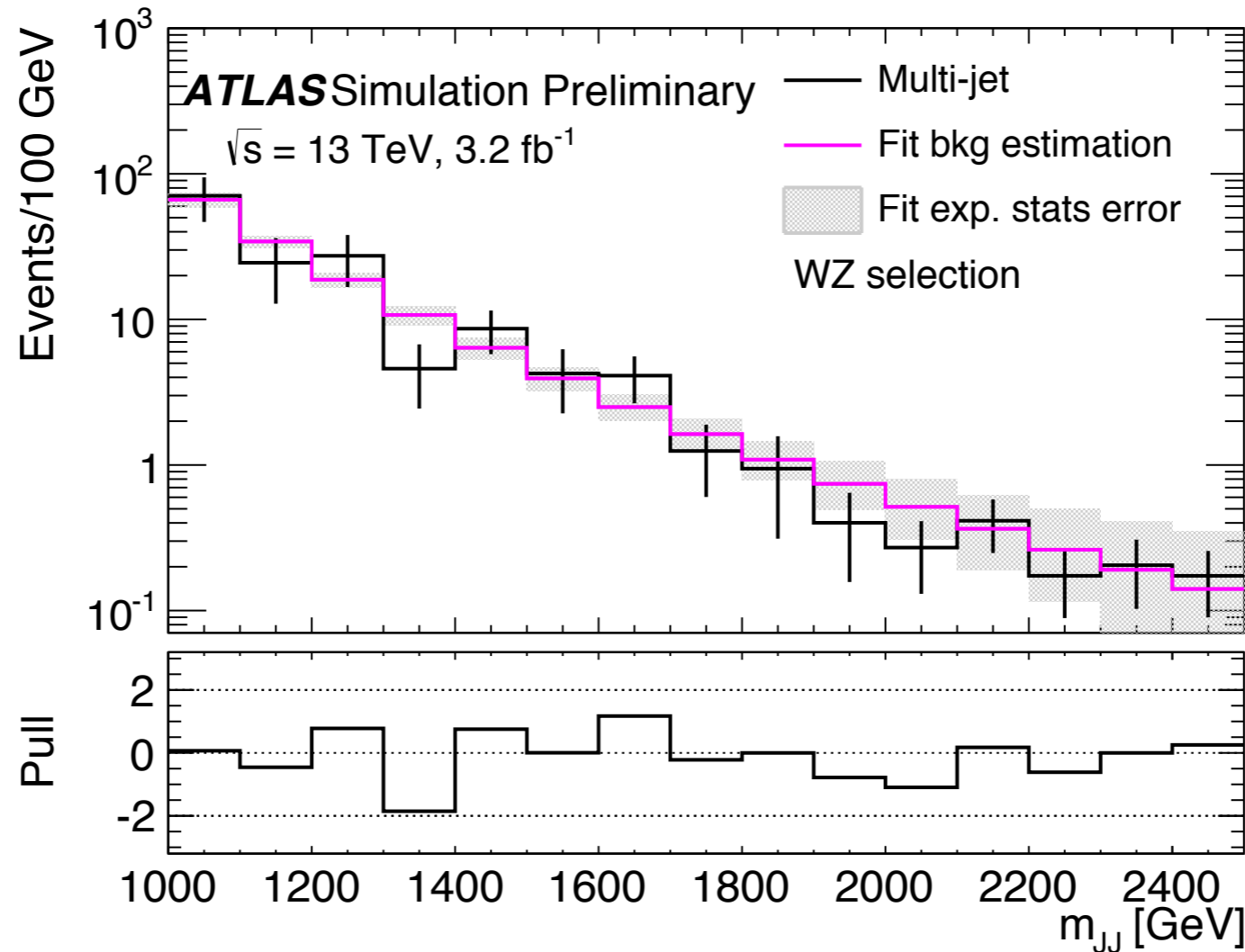
Selection	Data	HVT W' simulation
$m_{JJ} > 1000$ GeV	972069	21.5 ± 0.1
Topological selections	285474	15.4 ± 0.1
Boson tagging	128	3.09 ± 0.05



JJ探索



$$\frac{dn}{dx} = p_1(1-x)^{p_2-\xi p_3} x^{p_3}, \quad x = m_{jj}/\sqrt{s}$$

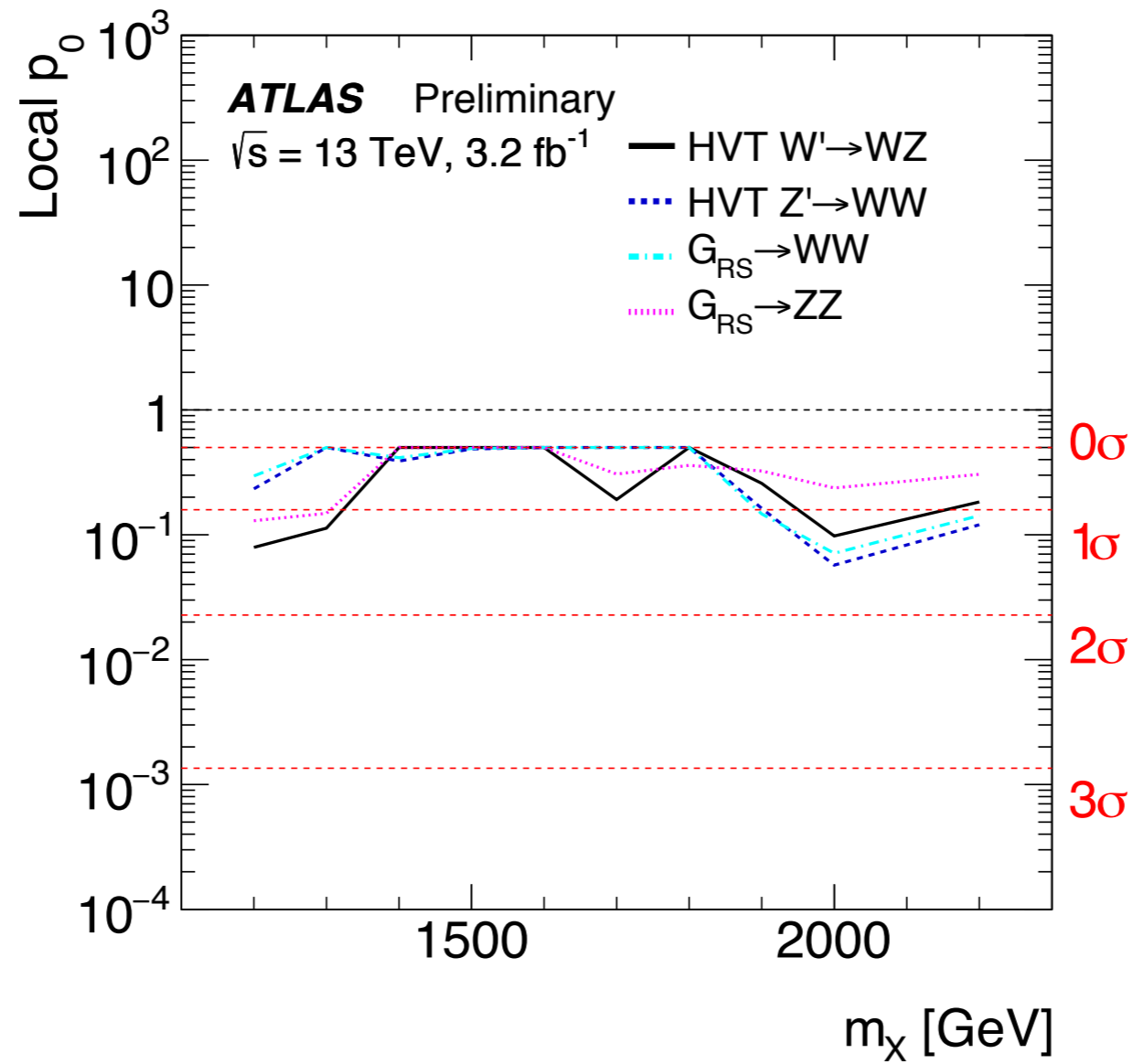


主な不定性: fitting, luminosity測定5%, scale/resolution of D_2 , mass, p_T

D_2 の不定性~5%, mass~6%, p_T ~5%



JJ探索



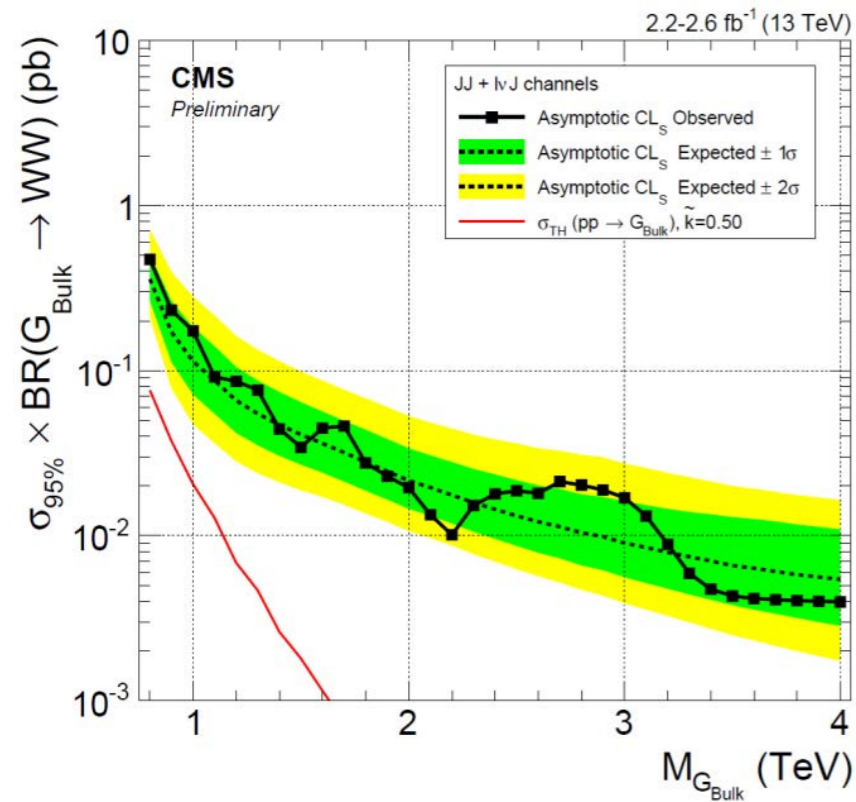


CMSでのVV→JJ探索

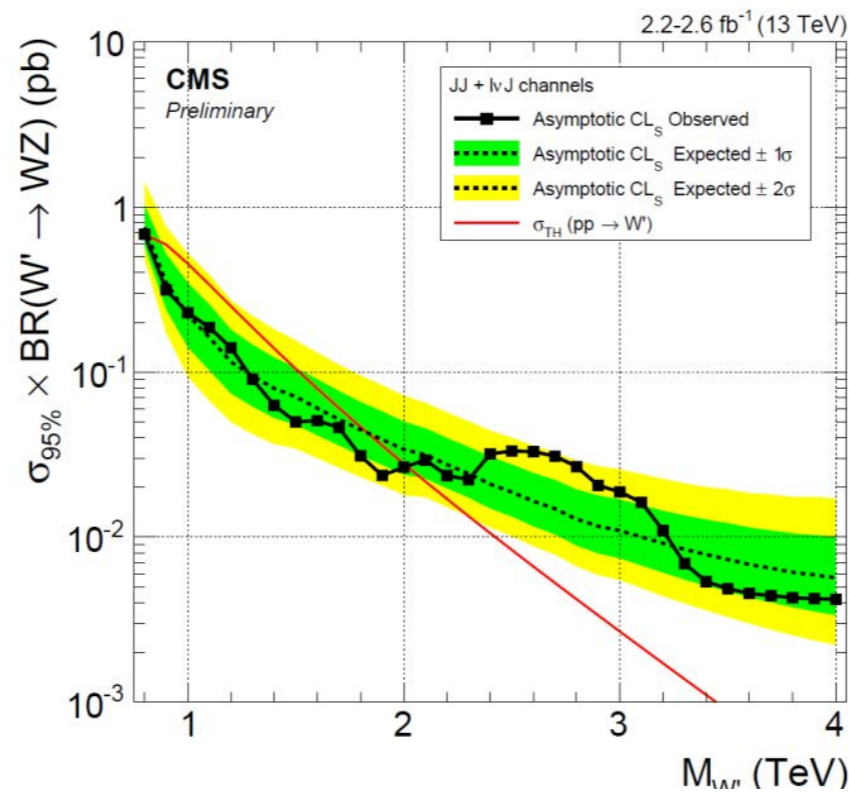


CMS

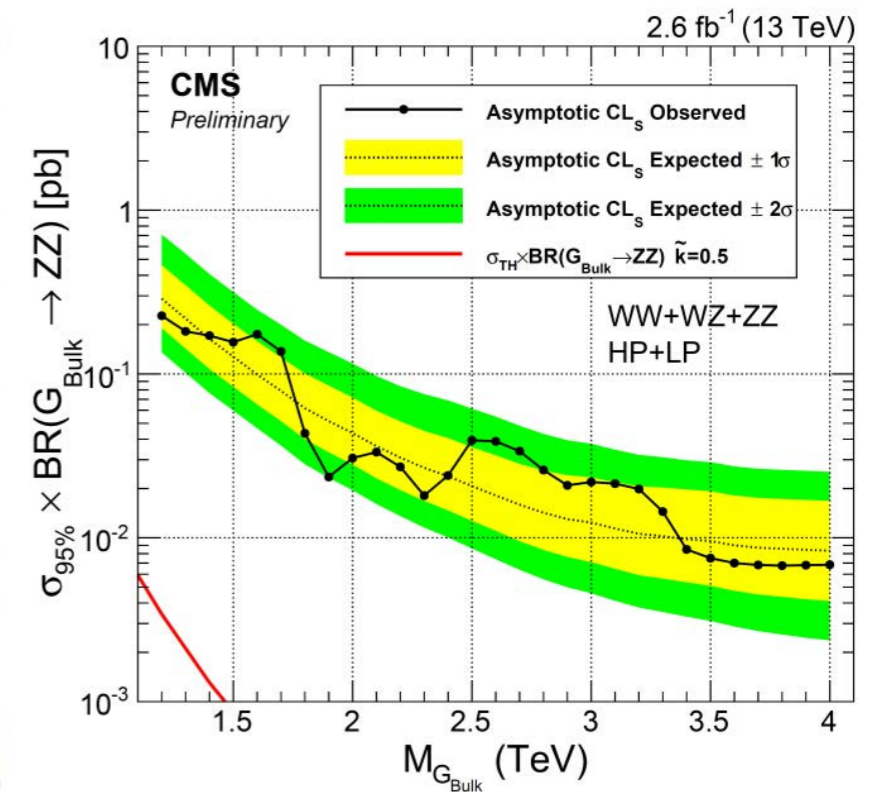
$G_{\text{Bulk}} \rightarrow WW$ (lvJ+JJ)



$W' \rightarrow WZ$ (lvJ+JJ)



$G_{\text{Bulk}} \rightarrow ZZ$ (JJ)

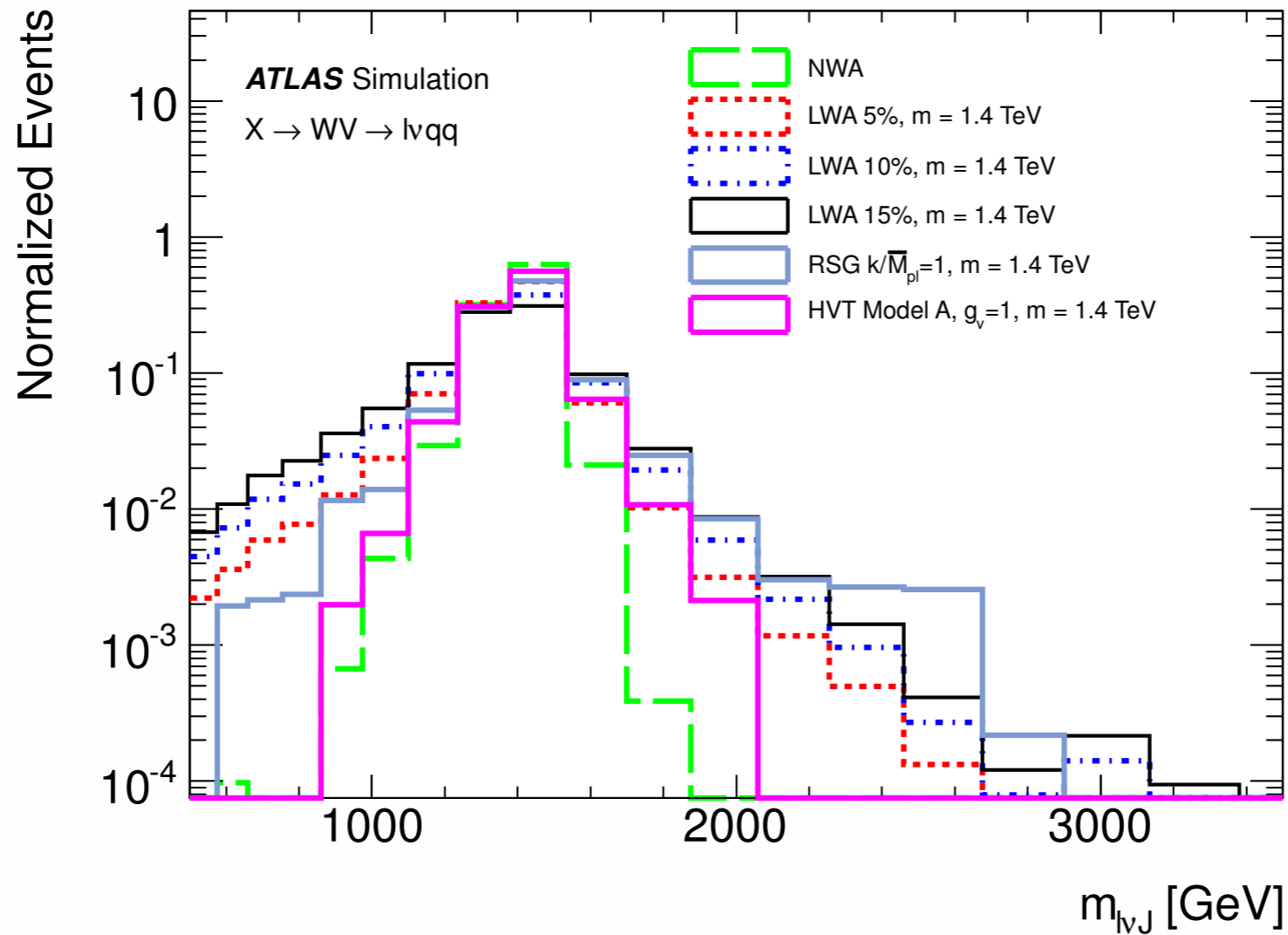




$WV \rightarrow lvqq$ (lvJ)



ATLAS-CONF-2015-075

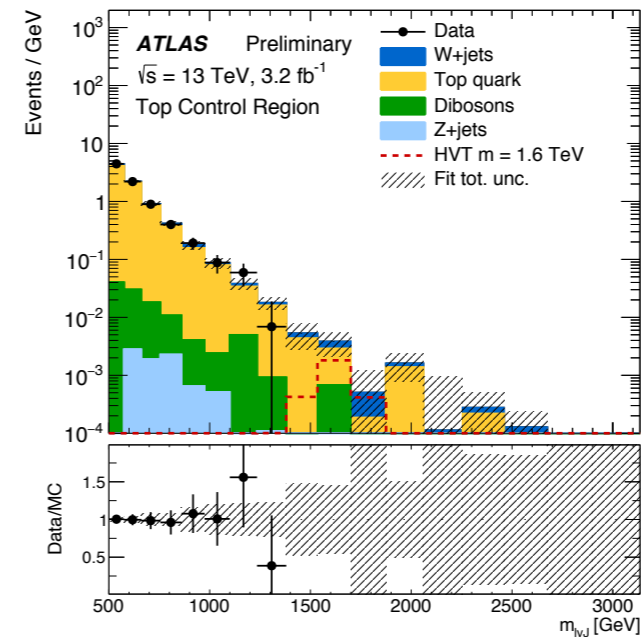
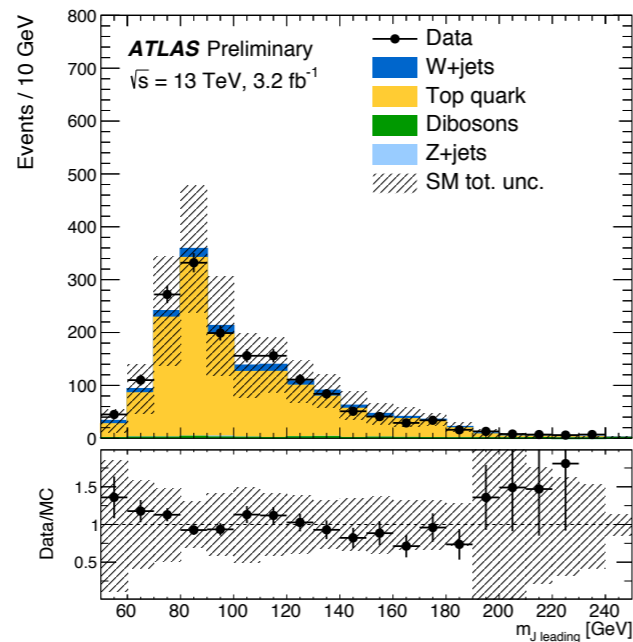
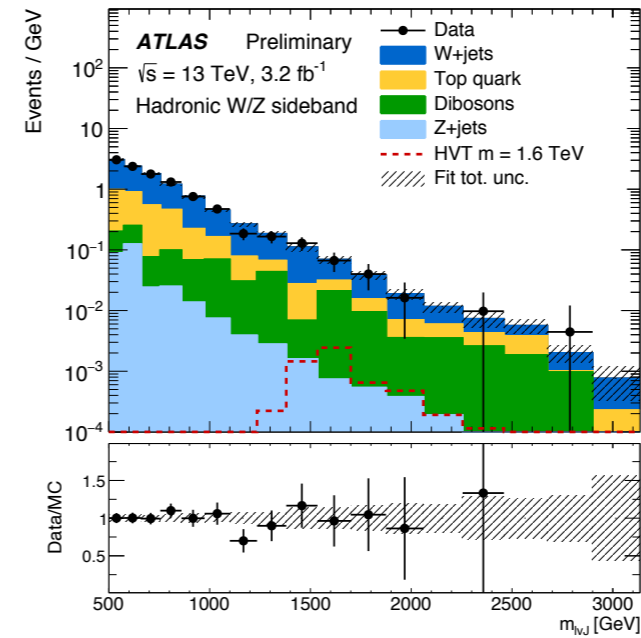
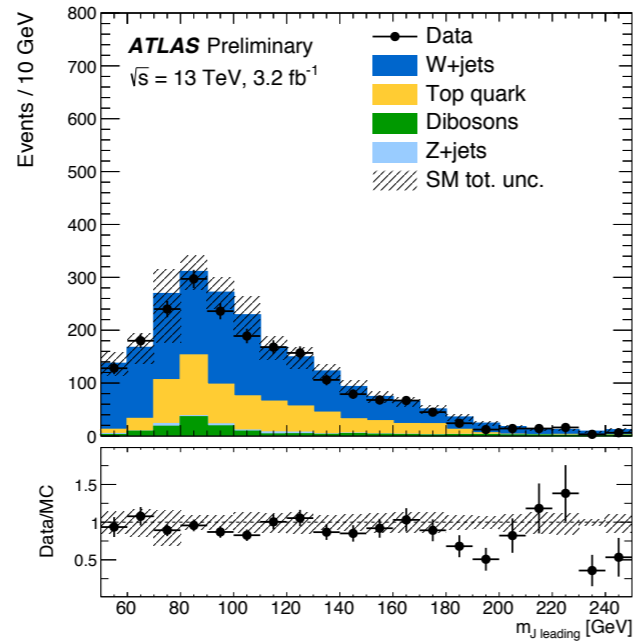




$WV \rightarrow lvqq$ (lvJ)



ATLAS-CONF-2015-075

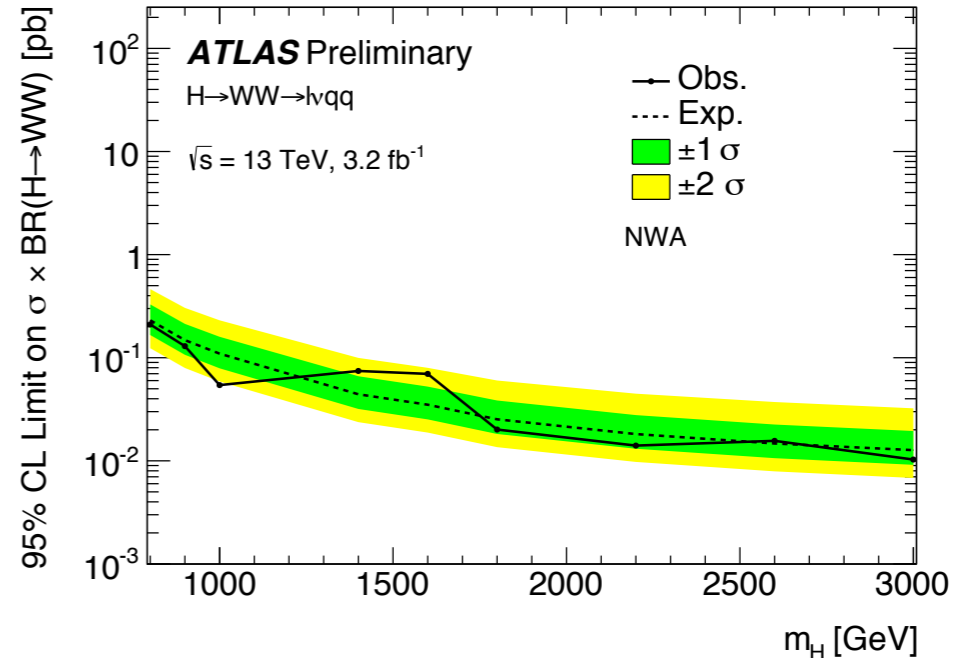
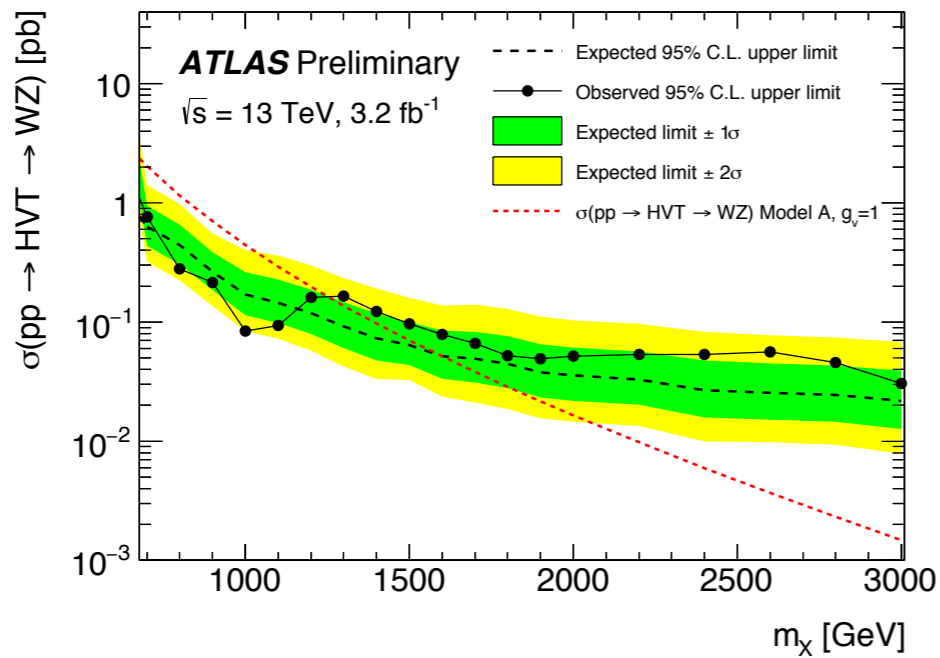
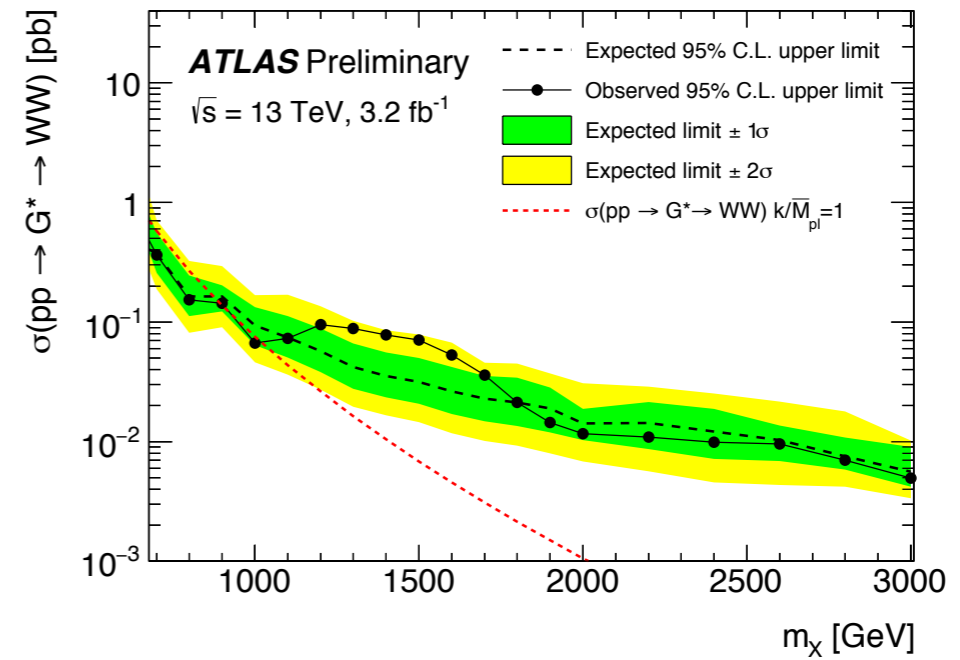
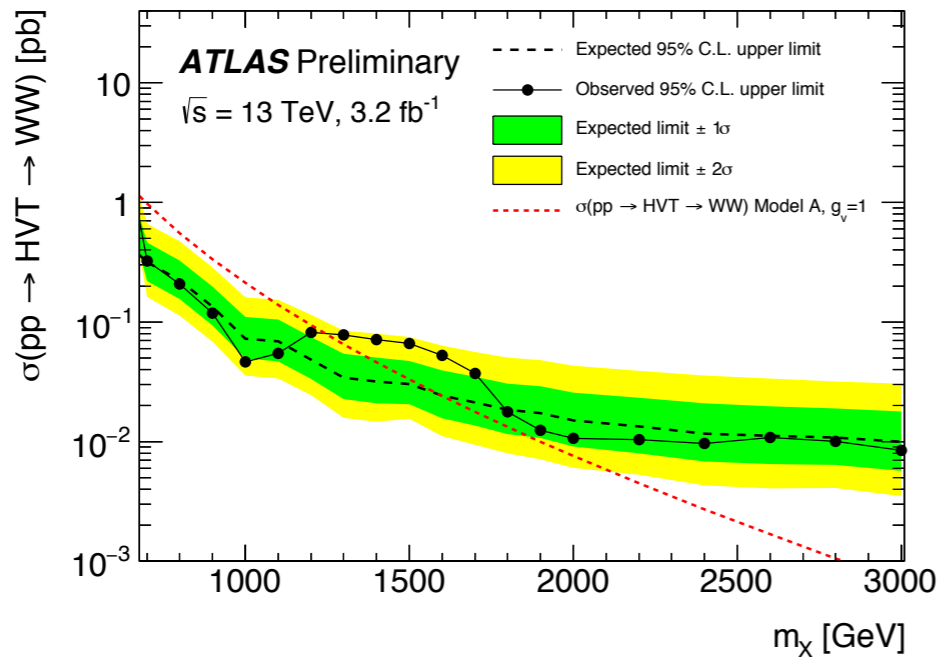




$WV \rightarrow lvqq$ (lvJ)



ATLAS-CONF-2015-075

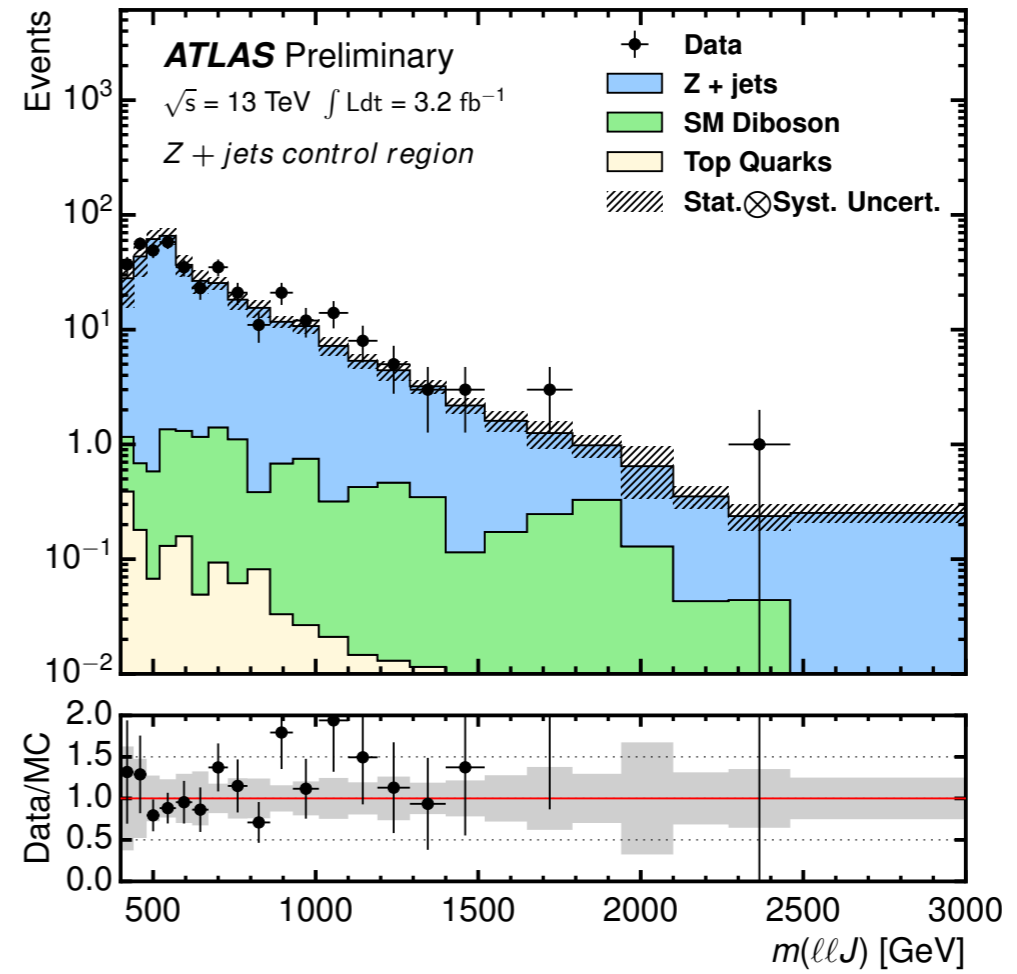
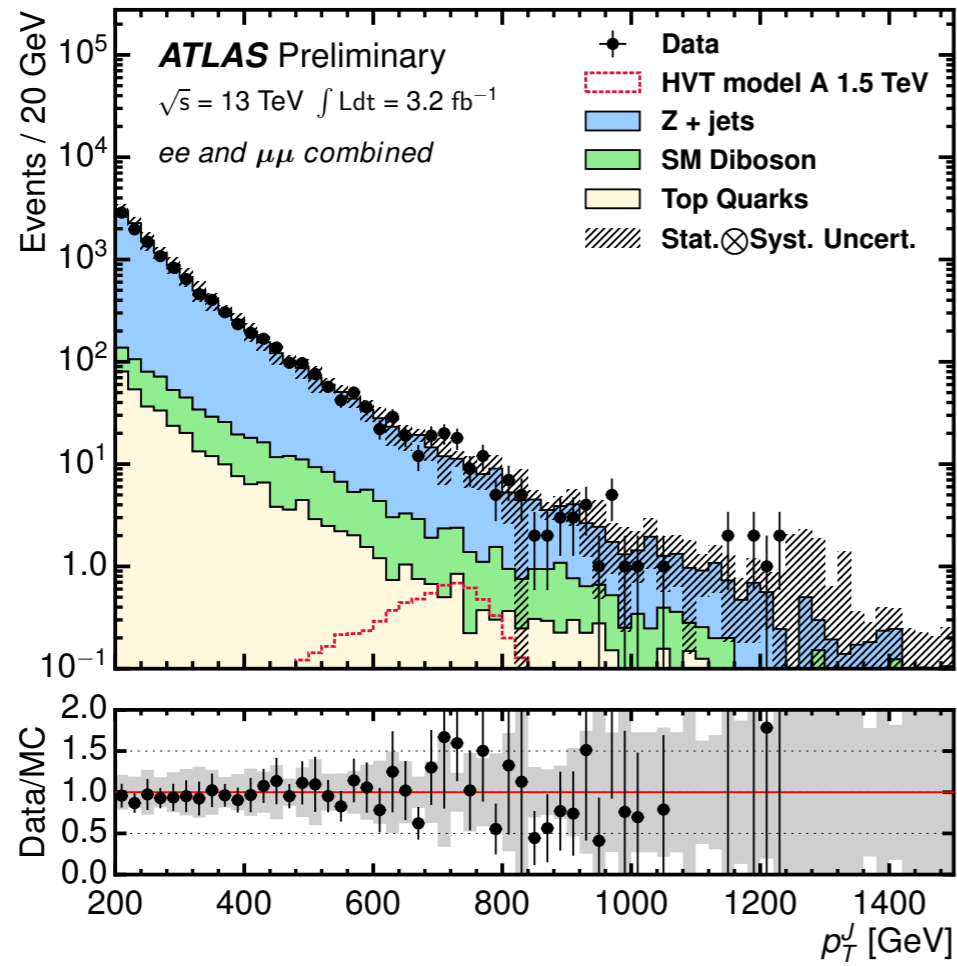




ZV → llJ 探索



ATLAS-CONF-2015-071

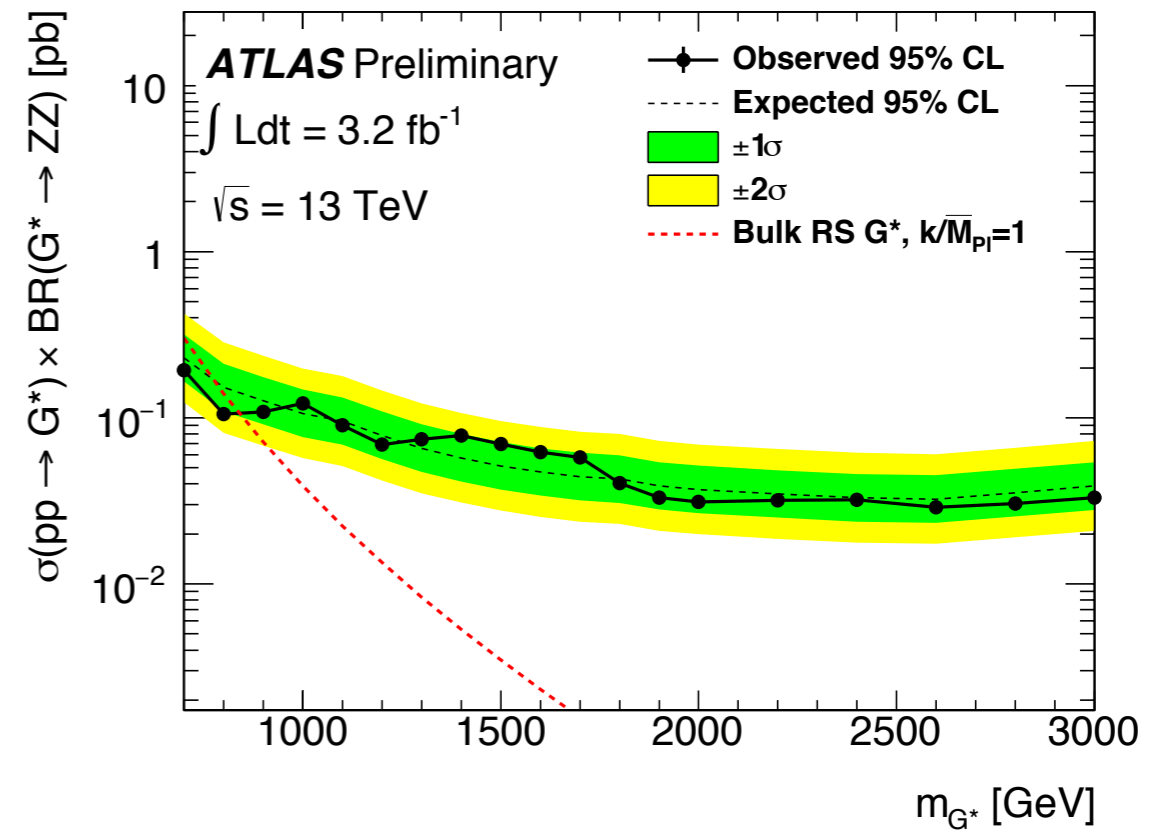
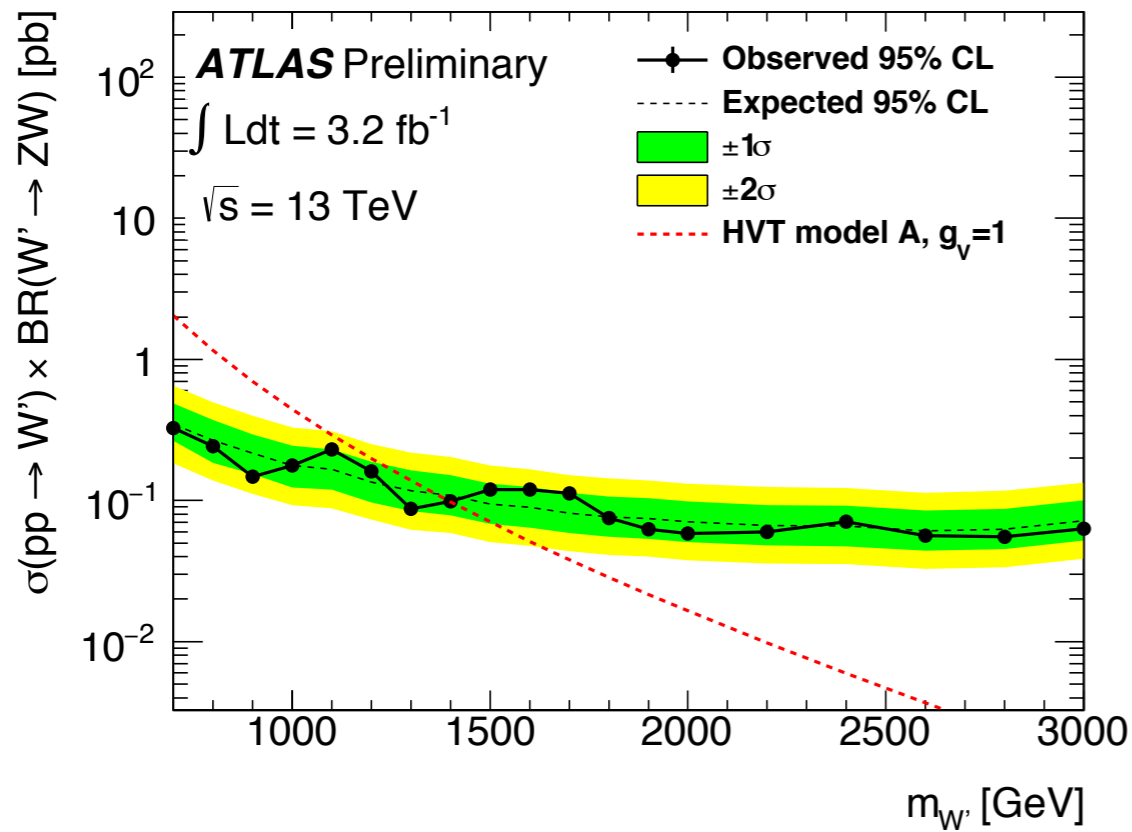




ZV → IIJ探索



ATLAS-CONF-2015-071

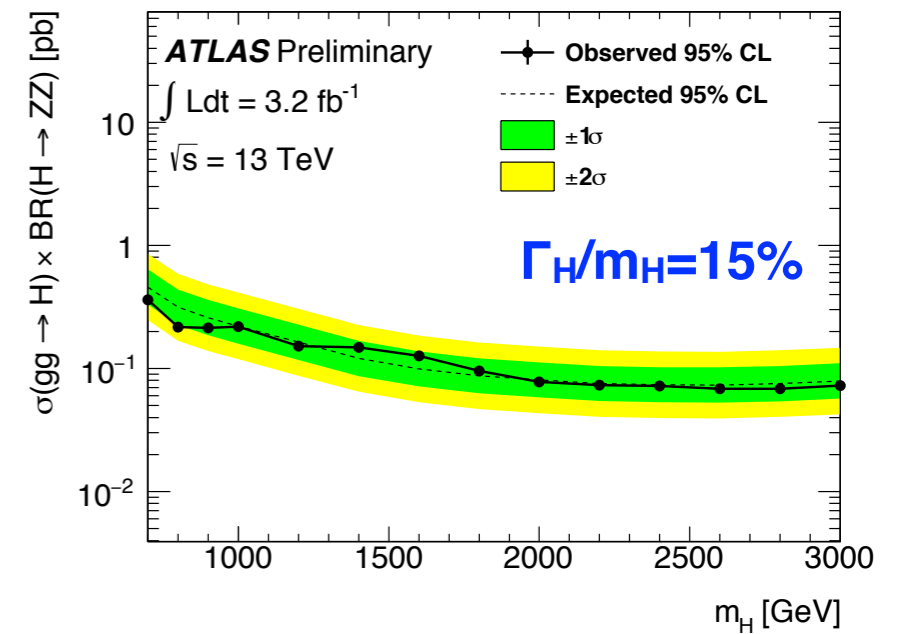
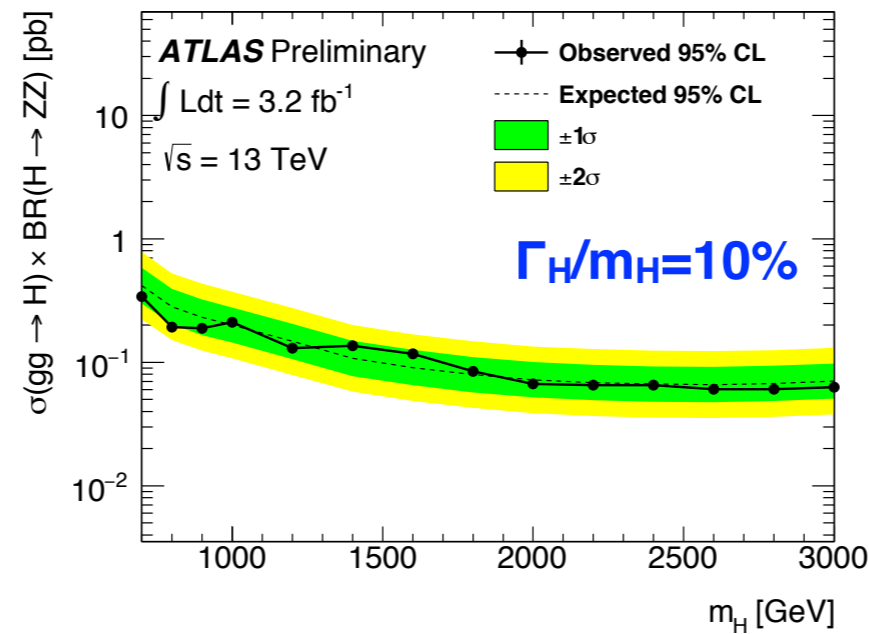
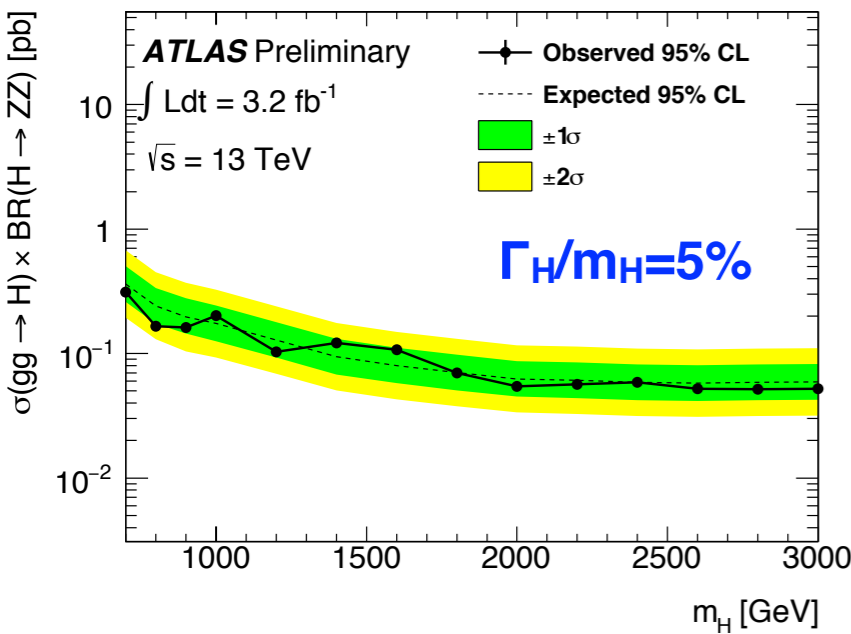
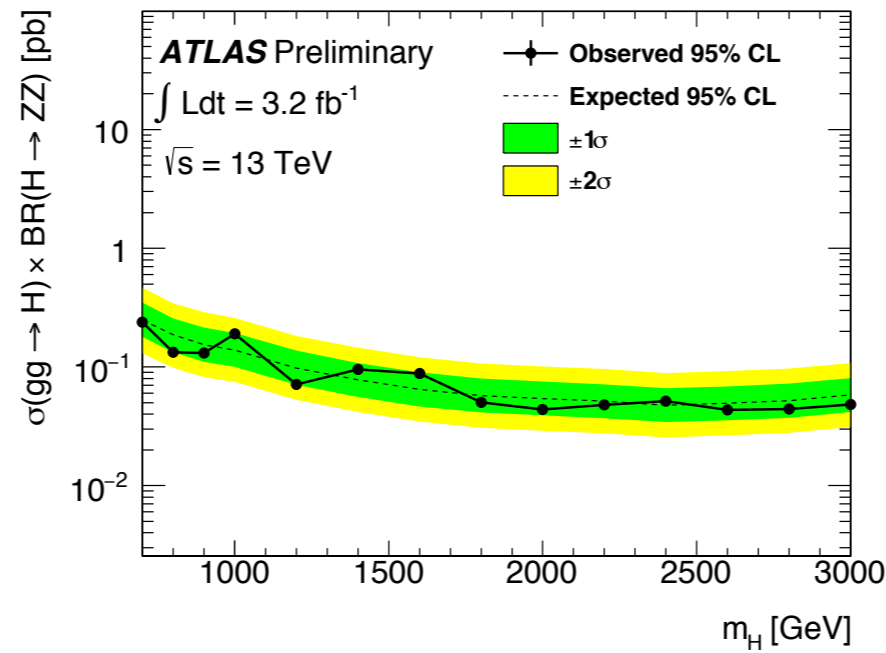




ZV → IIJ探索



ATLAS-CONF-2015-071

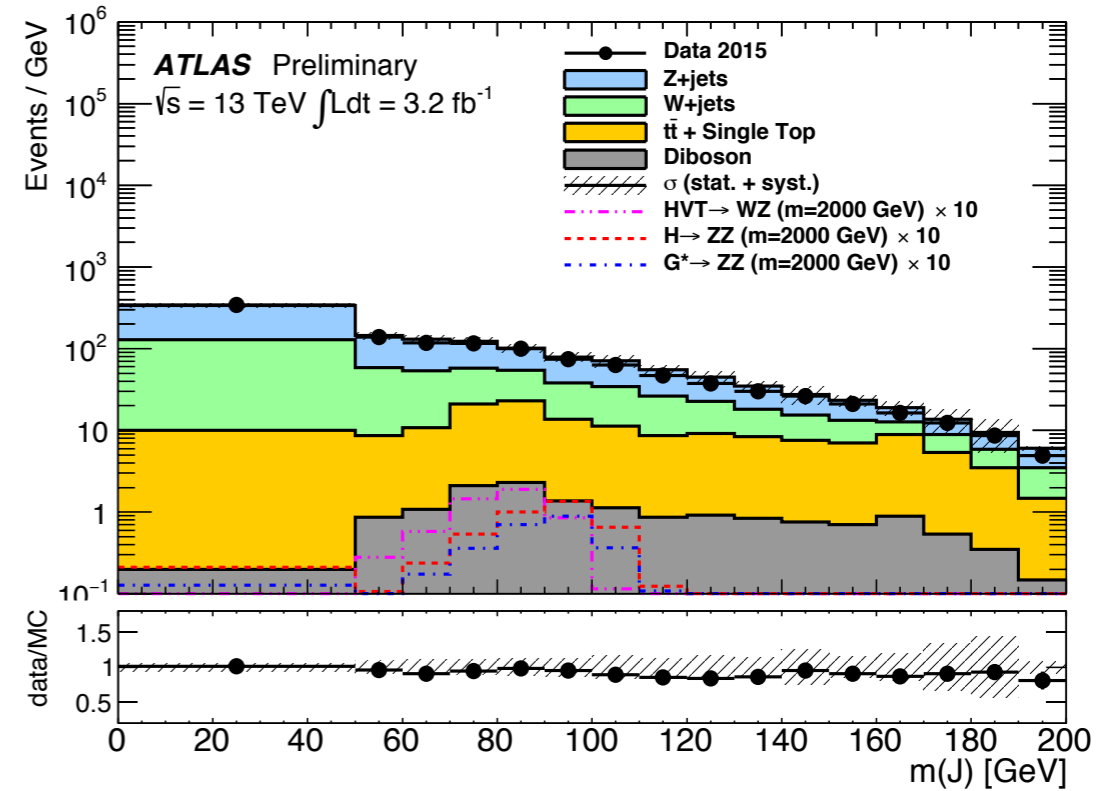
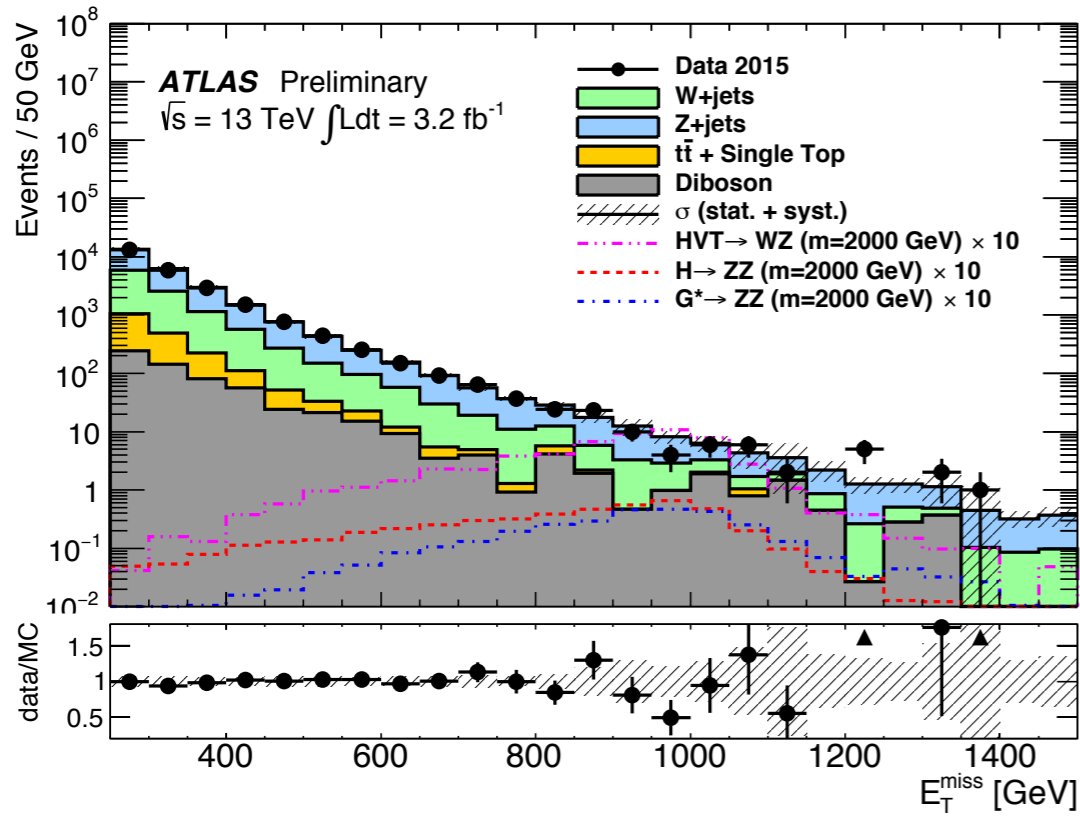




ZV → vvJ 探索



ATLAS-CONF-2015-068

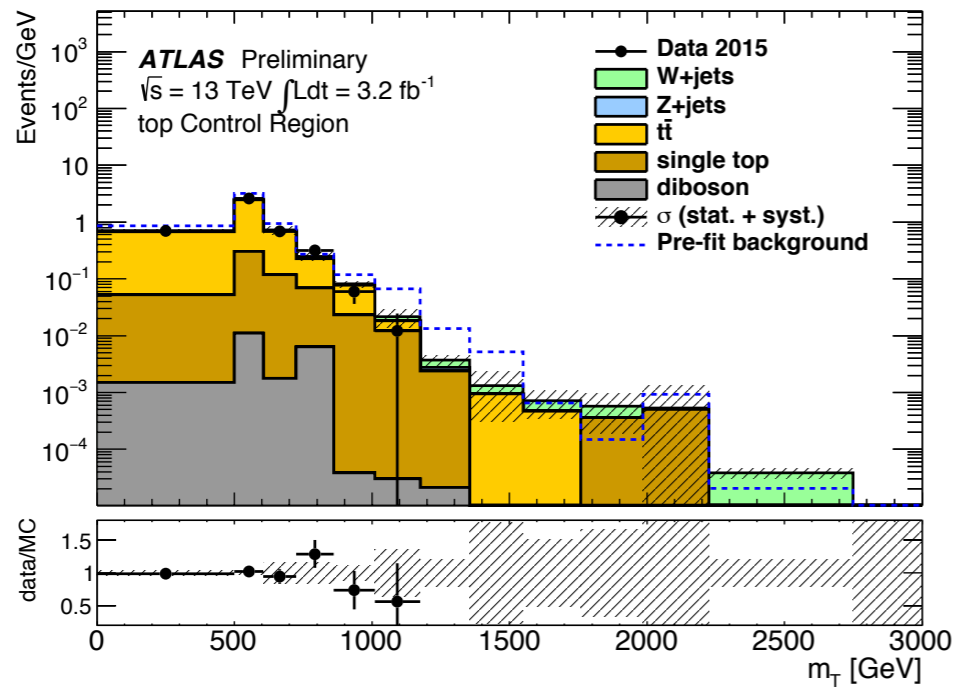
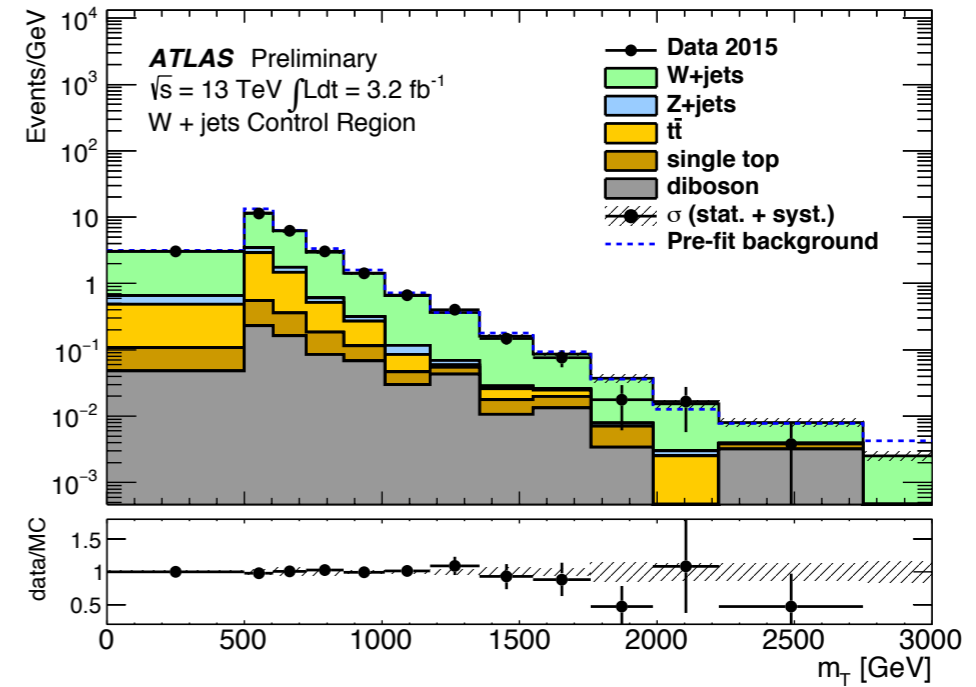
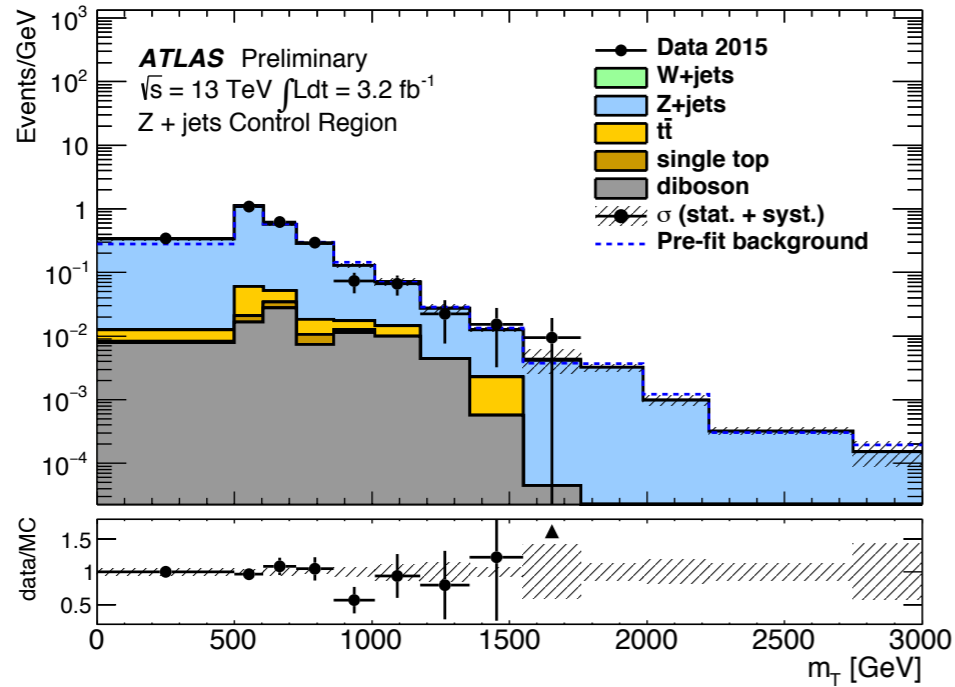




ZV → vvJ 探索



ATLAS-CONF-2015-068

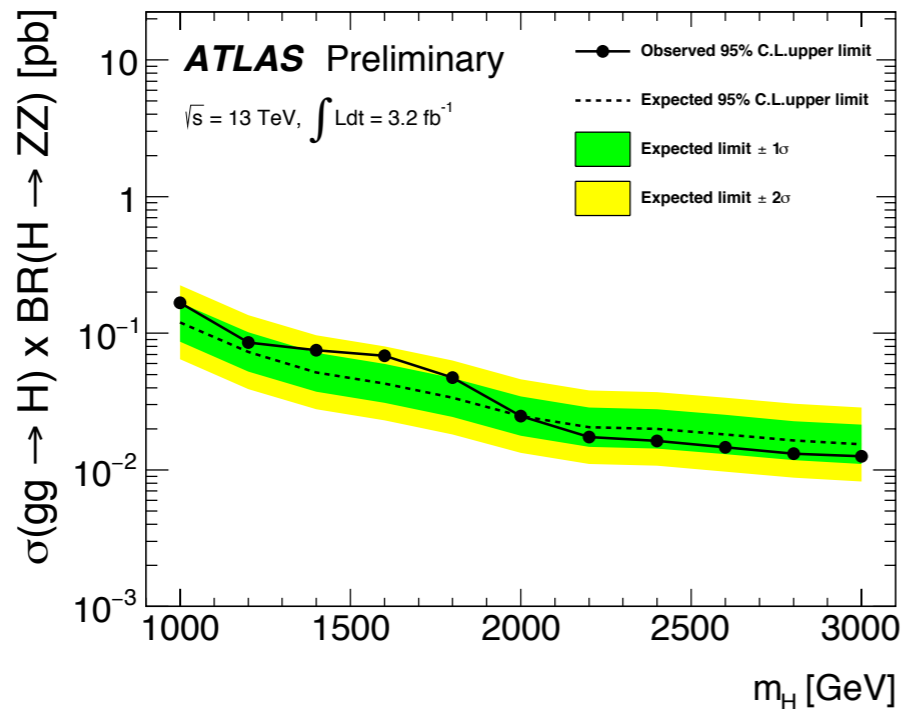
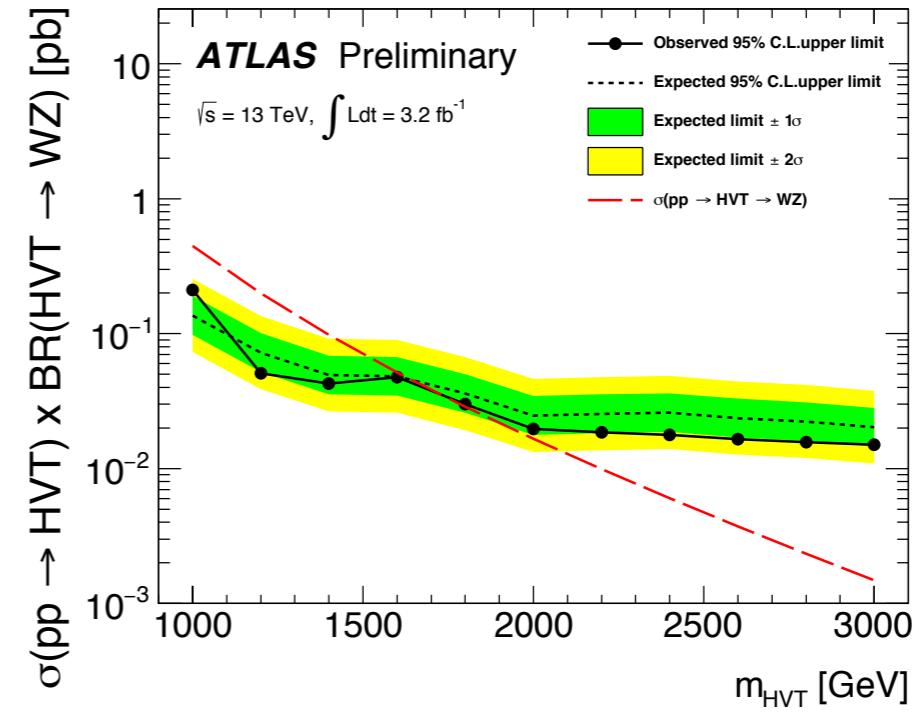
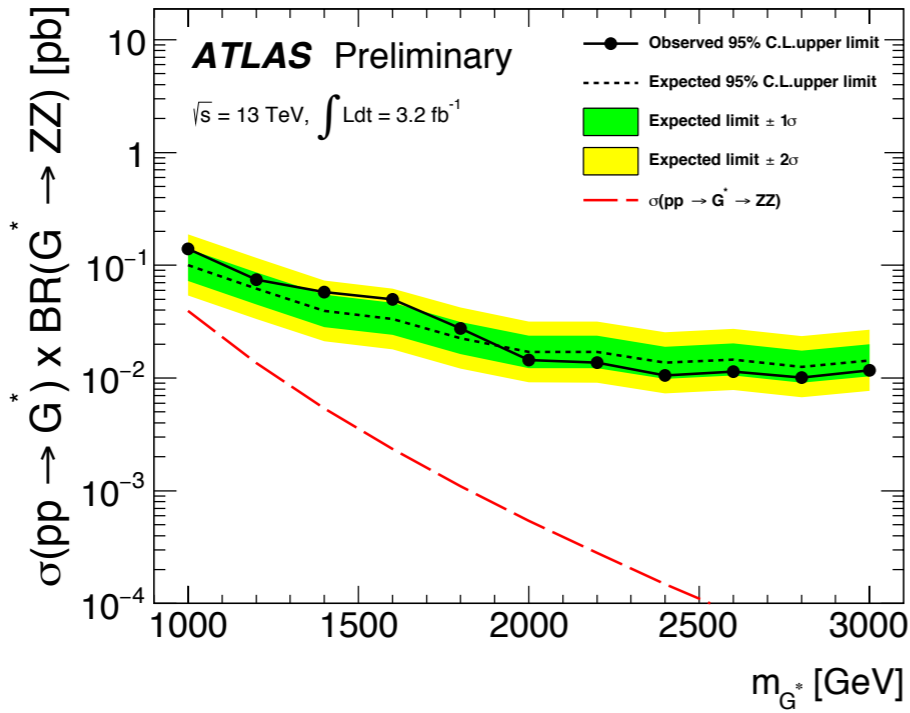




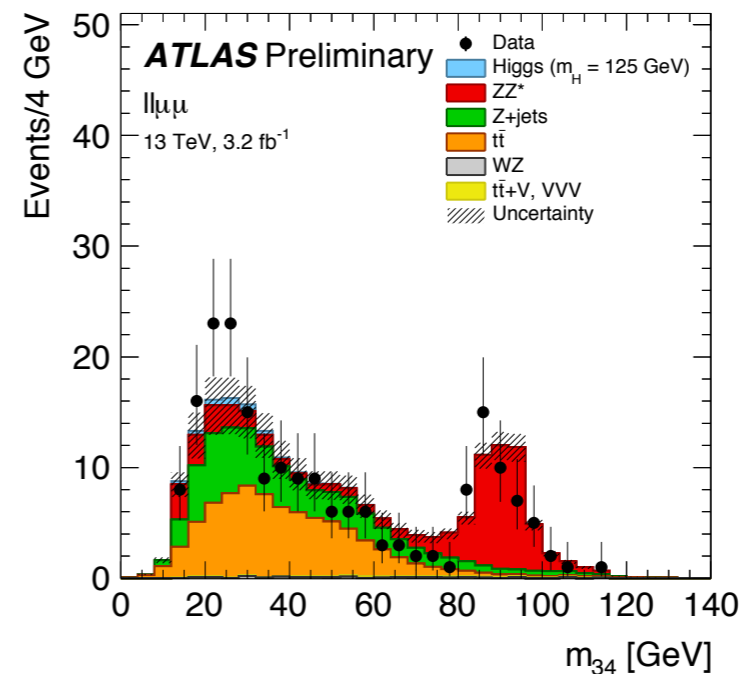
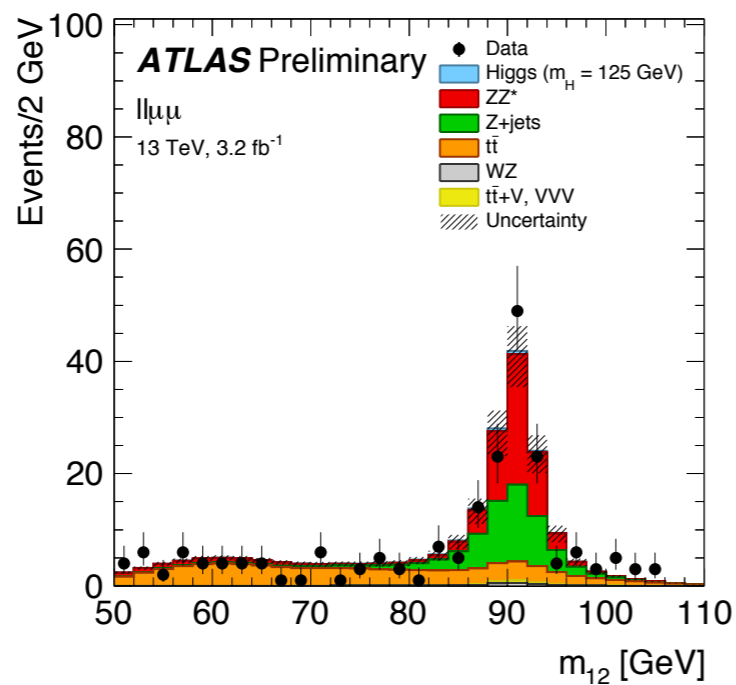
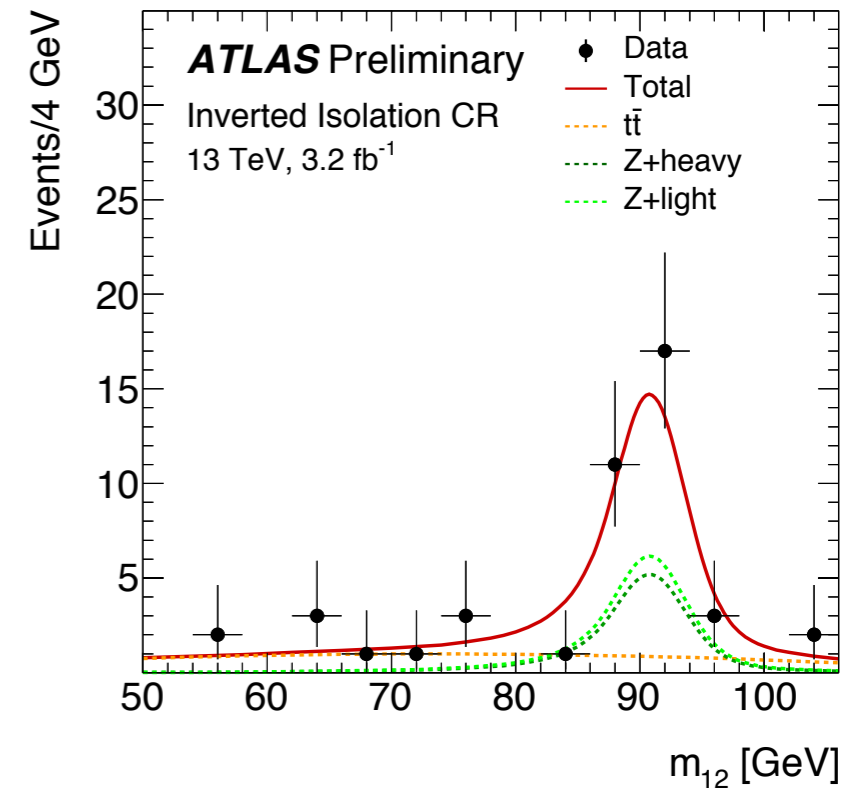
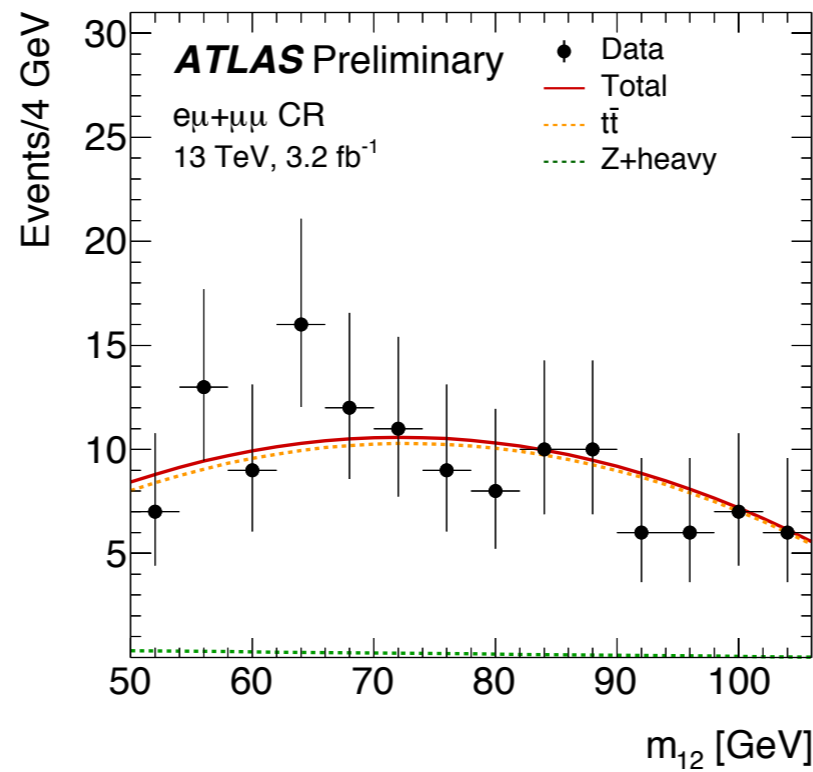
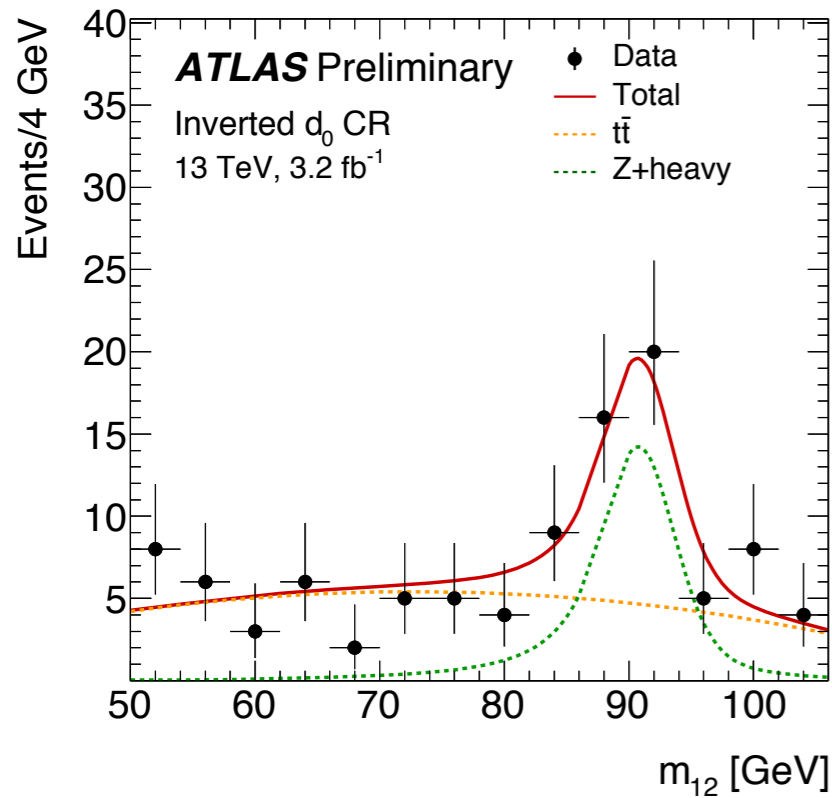
ZV → vvJ探索



ATLAS-CONF-2015-068



ZZ → 4l 共鳴事象探索 (ll+μμ)



ZZ → 4l 共鳴事象探索 (ll+ee)

