

修士学位論文

LHC-ATLAS 実験における $H \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \ell^+ \ell^- + 4\nu$ を用いた
標準模型 Higgs 粒子の探索

東京大学大学院
理学系研究科物理学専攻
浅井研究室

森永真央

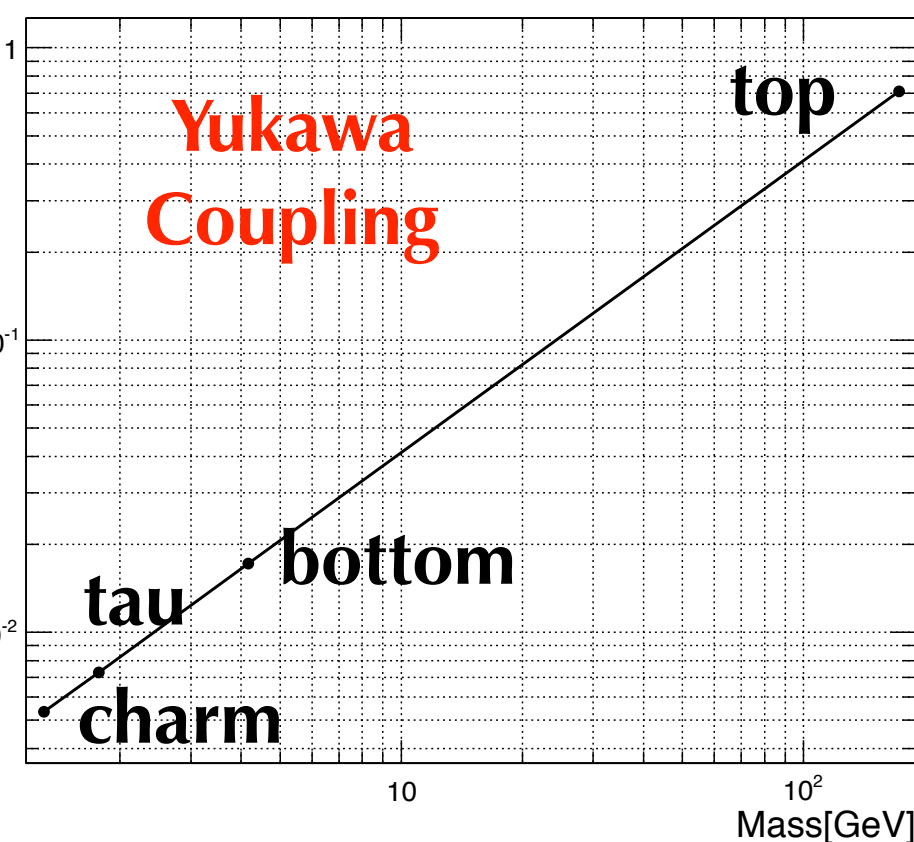
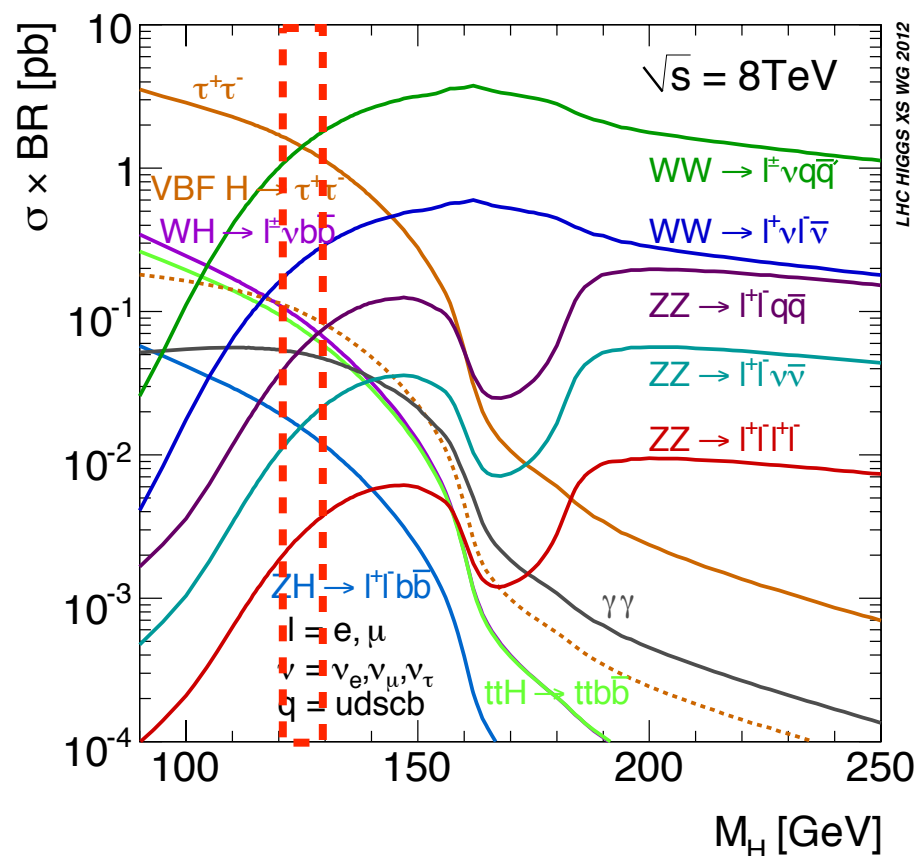


Outline

- 本研究の目的
- 解析の流れ
- 結果と考察
- まとめと今後の展望

本研究の目的

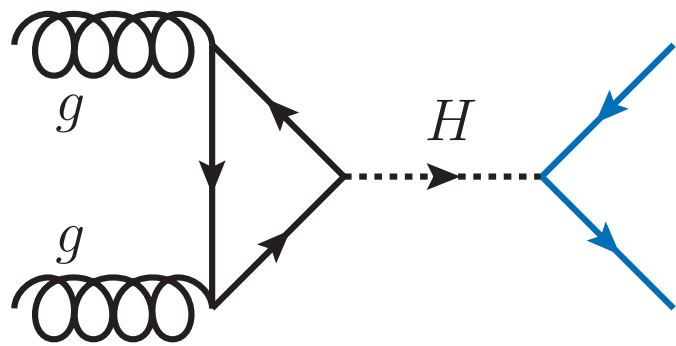
- 2012年7月,Higgs粒子らしき新粒子が発見された.この新粒子がHiggs粒子であるなら,**湯川結合が存在する.その有無を確かめることが現在最も重要**である.
- $H \rightarrow \tau\tau$ チャンネルは,125GeVのHiggs粒子に対して高い崩壊分岐比をもち, **τ 粒子との湯川結合を測定可能な唯一のチャンネル**である.
- 本解析では,LHC-ATLAS実験において,2011年,2012年runの合計 17.6fb^{-1} の取得データを用いて探索を行った.



Higgs粒子

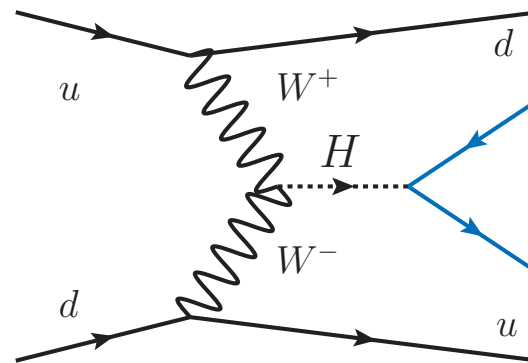
- Higgs粒子の生成過程: 主に3つ

gluon gluon-Fusion(ggF)



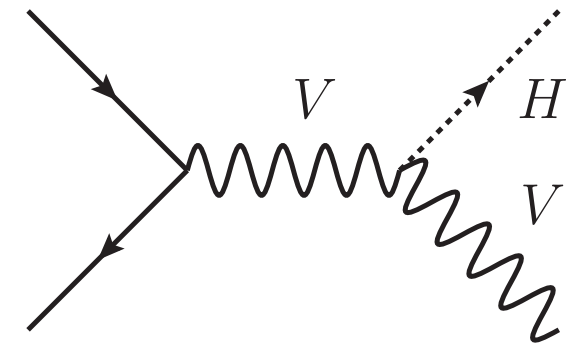
- LHCでの主な生成過程
- 主にtopのループで生成
- jetを捕まえて, S/Nを上げる
- $\sigma_{SM} \times Br = 0.157 \text{ pb}$

Vector Boson Fusion(VBF)



- クォークがW/Zを生成し2つのWZから生成される
- クォークが前後方にjetとして観測される
- 2つのクォーク間にはカラーコネクションがない
- $\sigma_{SM} \times Br = 0.013 \text{ pb}$

W/Z Associated(VH)



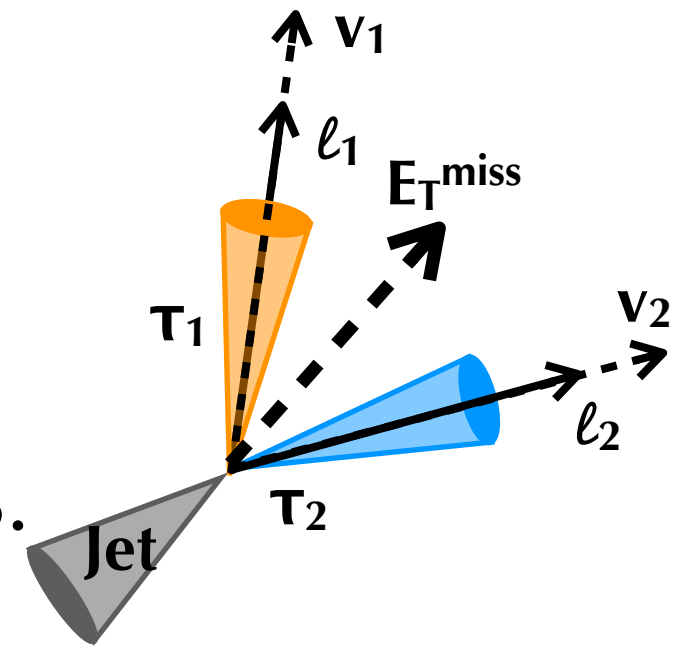
- W/ZがHiggsをはきだす
- W/ZとHiggsがback-to-backになりやすい
- W/Zの崩壊を捕まえることでS/Nを上げる
- $\sigma_{SM} \times Br = 0.009 \text{ pb}$

- Higgs → $\tau\tau$ 崩壊: τ 粒子の終状態によって3つのチャンネルがある

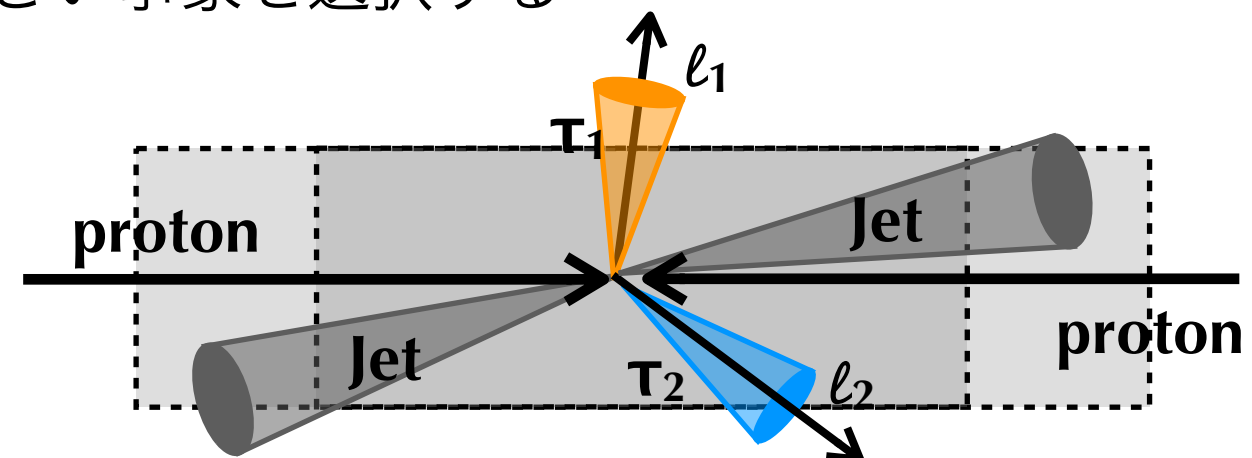
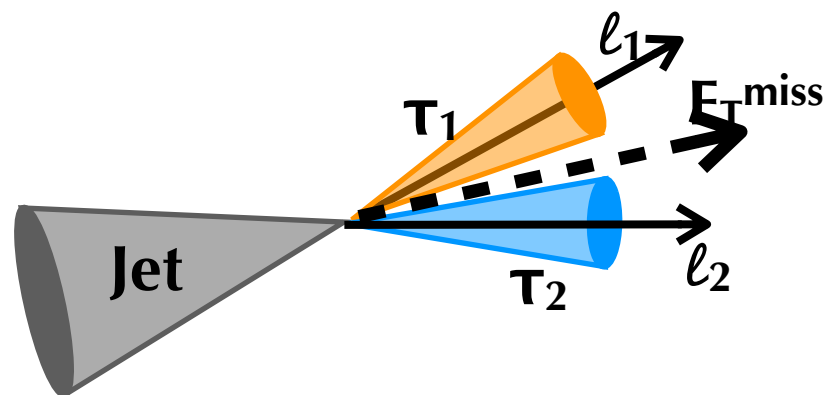
- hadron-hadron(44%), lepton-hadron(43%): 数が多いが, Fake tau事象の制御が難しい
- lepton-lepton(12%): 1/4程度だが圧倒的にクリーンで系統誤差は相対的に小さくなる
⇒ Higgs粒子の性質の測定に有利なチャンネル.

Signal Topology

- **Signal Topology:** 終状態に2つのlepton(e, μ), E_T^{miss} (ニュートリノ), jets
 - 3つのflavor($ee, e\mu, \mu\mu$)に分けられる
 - 崩壊粒子の方向は τ 粒子の方向に近い($p_\tau \gg m_\tau$)
 - 2つの τ 粒子がCollinearな崩壊 $\rightarrow E_T^{\text{miss}}$ がleptonの間に観測される.
 - E_T^{miss} を効率よく捕まえるためjetを要求する.

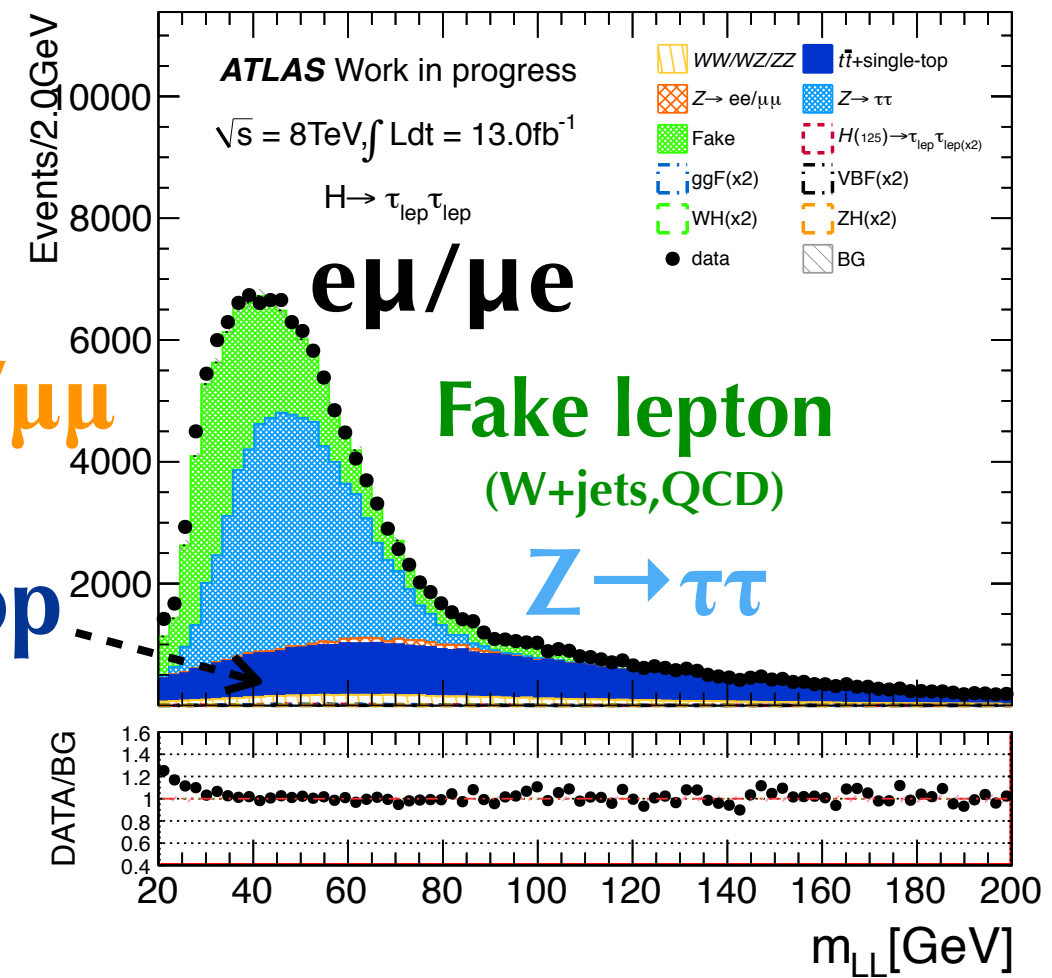
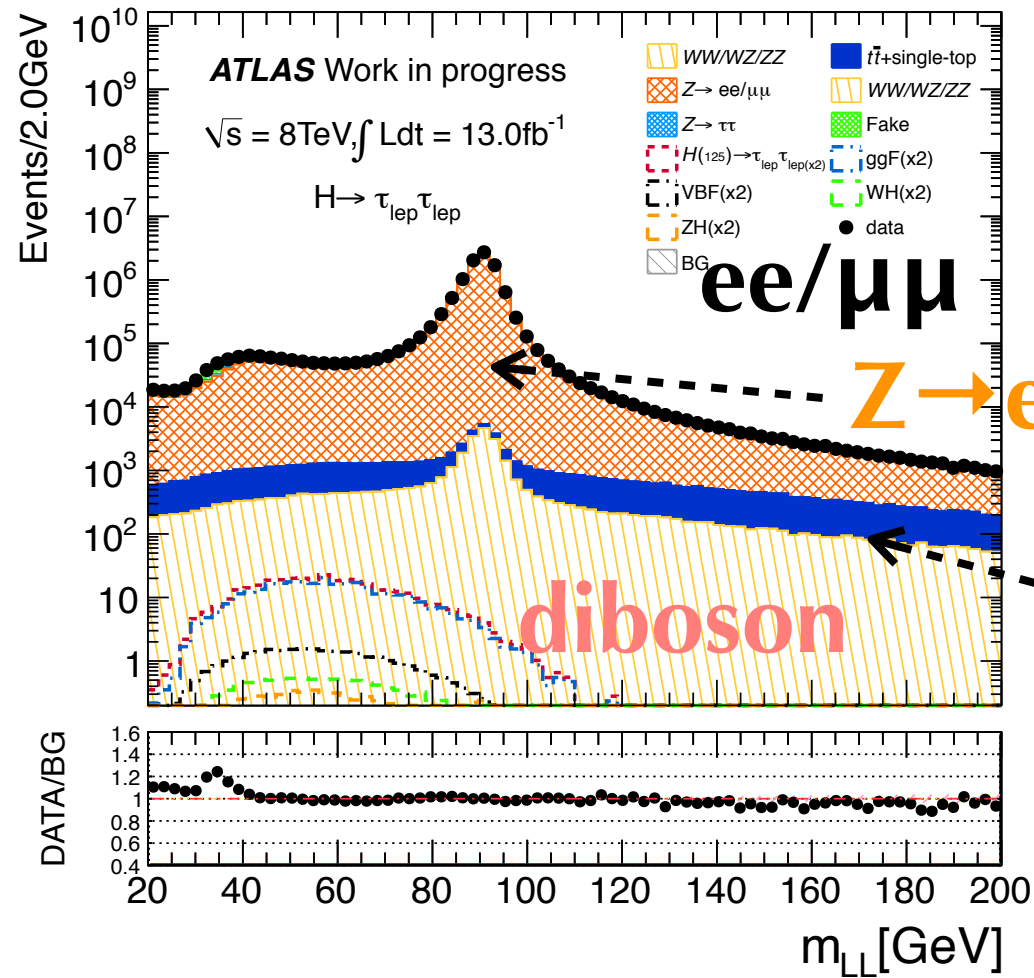
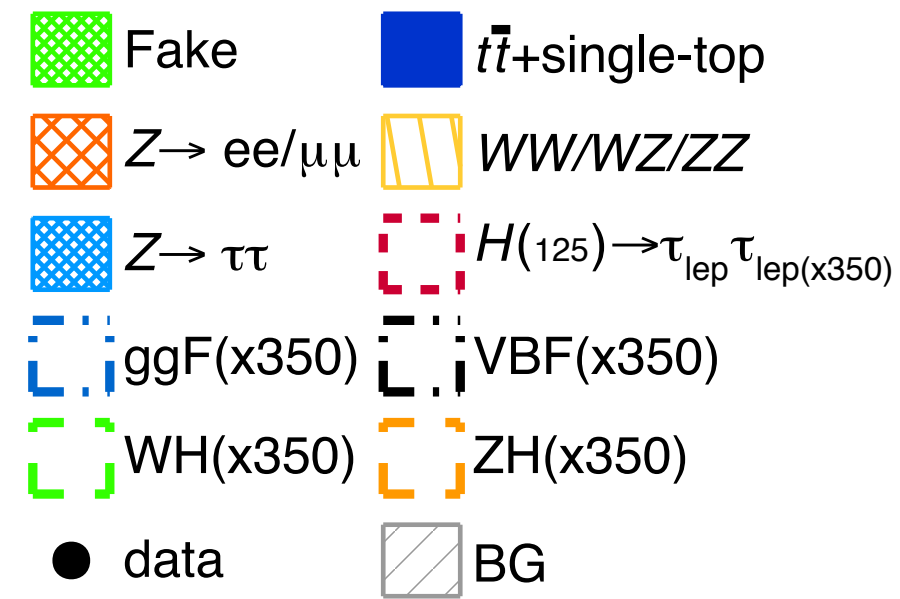


- **VBFの特徴:** クォークからのベクターボソン2つからHiggs粒子が生成される.
 - クォークがW/Zを生成するため, クォークは高い運動量を持ったjetとして観測
 - ➔ 前後方へ離れたjetを2つタグすることで探索感度が向上する.
- **Boosted事象:** Higgs粒子がHigh p_T jet, W/Zとともに生成されブーストするTopology
 - ggF過程はjetとともに生成される jetは, high p_T になりやすい.
 - 2leptonと E_T^{miss} で組んだベクターの p_T が大きい事象を選択する



背景事象

- 背景事象には, lepton, E_T^{miss} , jetが伴うプロセス
- 2つのleptonを選択した後の $m_{\ell\ell}$ 分布.
 - Flavor($ee/\mu\mu$, $e\mu/\mu e$)で背景事象の構成が異なる



- **Fake lepton事象:** MCでの見積もりは困難→データから見積もる
- **$Z \rightarrow \tau\tau$:** irreducibleな背景事象, 違いは質量だけ→**質量再構成が重要**
- その他の背景事象: MCサンプルを観測データを用いて補正する

質量再構成

- Higgs粒子と $Z \rightarrow \tau\tau$ を見分けるには質量の再構成が重要

- 崩壊粒子の方向が元の τ 粒子の方向に近い $\rightarrow$ Collinear近似

- **Collinear mass:** di-tau Collinear近似を用いて再構成した質量

- **MMC(Missing Mass Calculator) mass:**

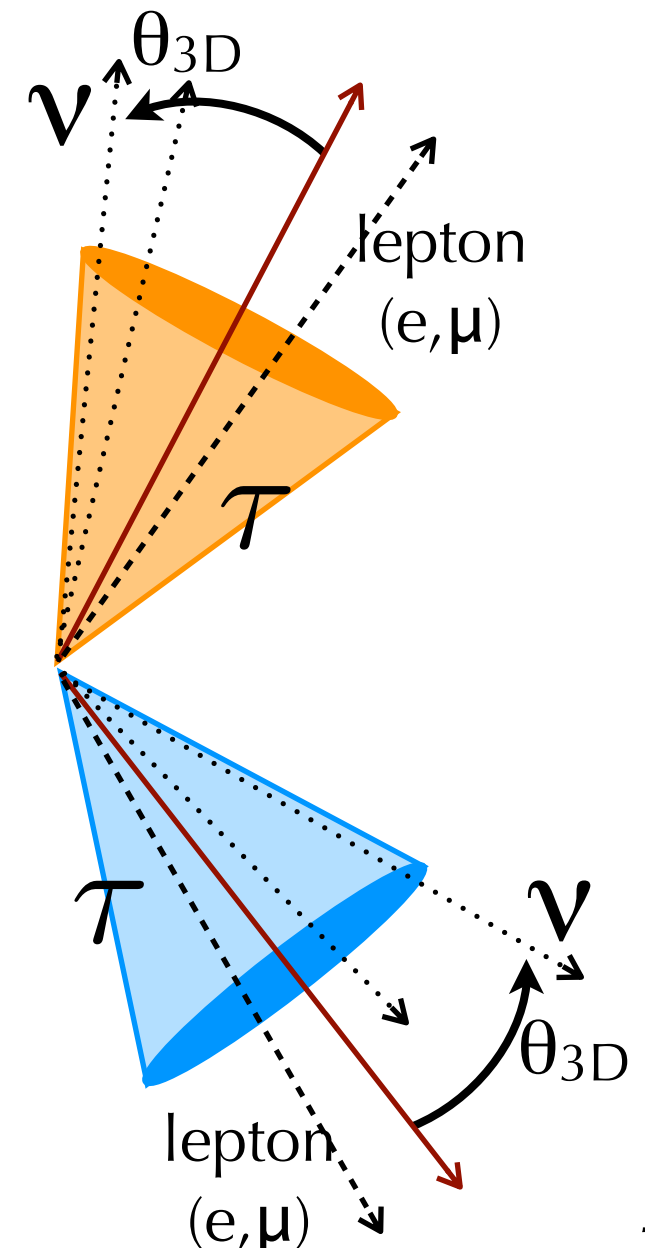
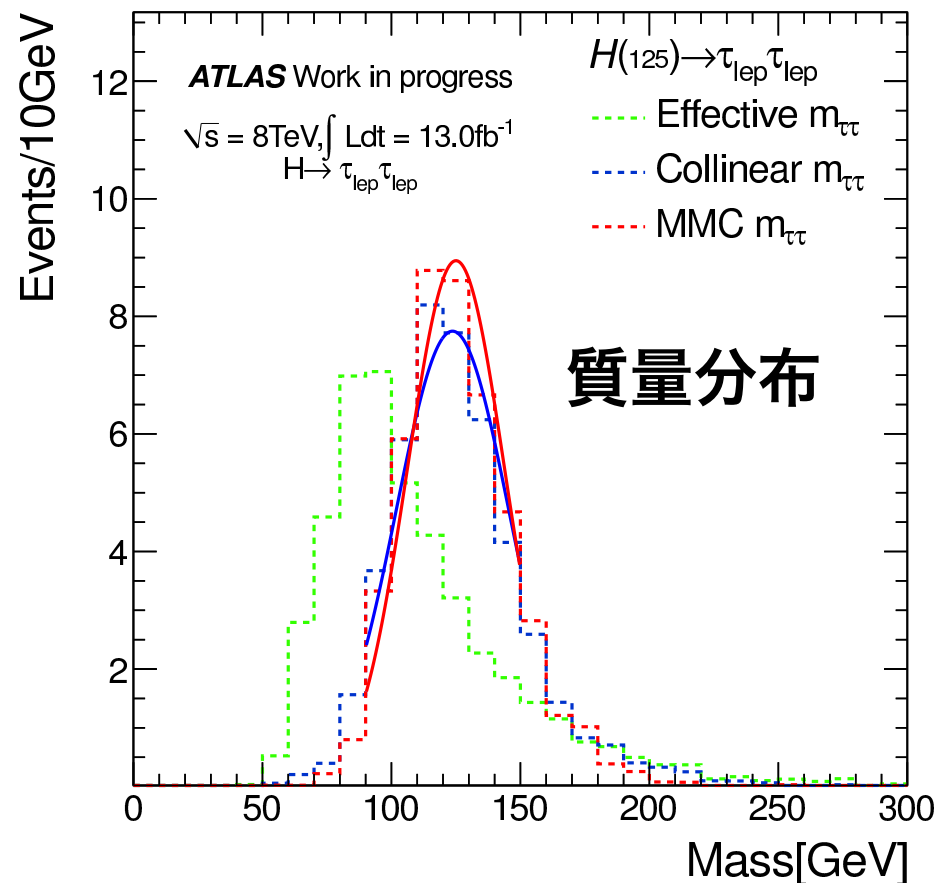
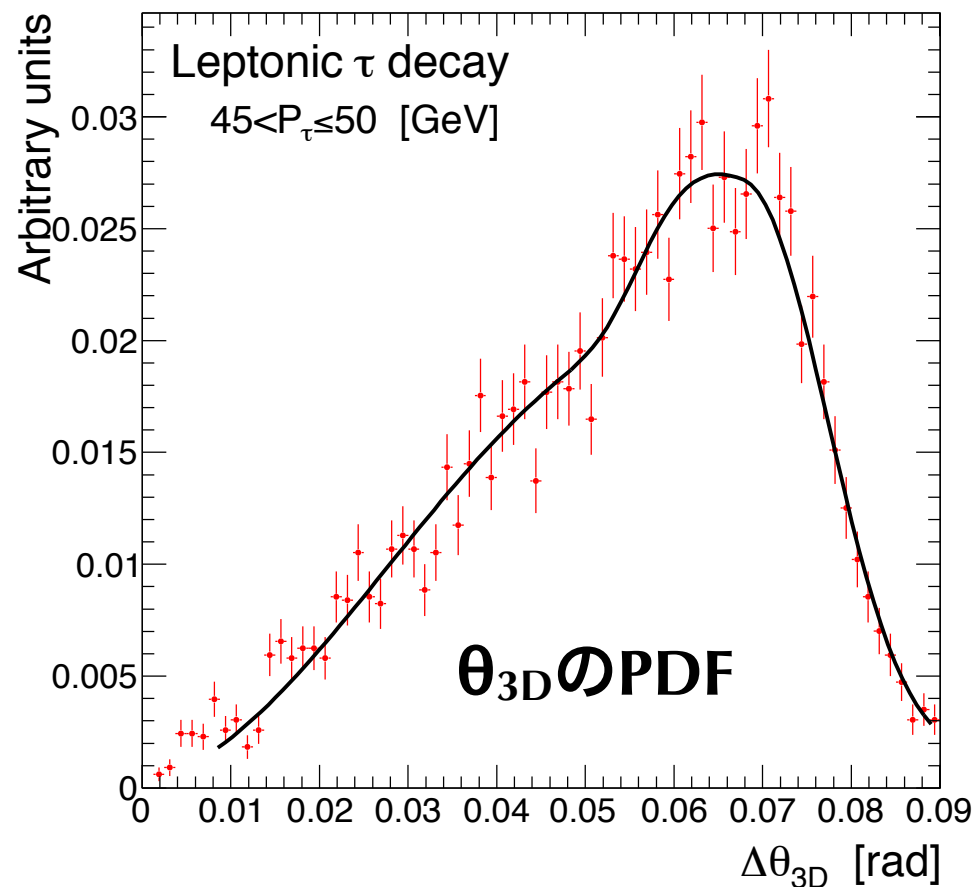
- τ 粒子の方向と再構成可能な崩壊粒子(群)の3次元的な角度(θ_{3D})をPDF(確率密度関数)にもつLikelihoodを用いて再構成した質量

$$\mathcal{P}_{event} = \mathcal{P}(\Delta\theta_1, p_{\tau 1}) \times \mathcal{P}(\Delta\theta_2, p_{\tau 2}) \times \mathcal{P}(\Delta E_x^{\text{miss}}) \times \mathcal{P}(\Delta E_y^{\text{miss}}),$$

$$m_{\tau\tau}^{\text{coll}} = \frac{m_{\ell\ell}}{\sqrt{x_1 x_2}}$$

$$x_{1,2} = \frac{p_{\ell_{1,2}}}{p_{\ell_{1,2}} + p_{\text{miss}_{1,2}}}$$

$$0 < x_{1,2} < 1.0$$



解析の流れ

- 事象選択: 背景事象の排除とSignal Topologyの選択
- 各背景事象の見積もり:
 - Fake lepton事象の見積もり
 - $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象の見積もり
- カテゴライゼーション(Signal Region:SRの設定)
- 結果

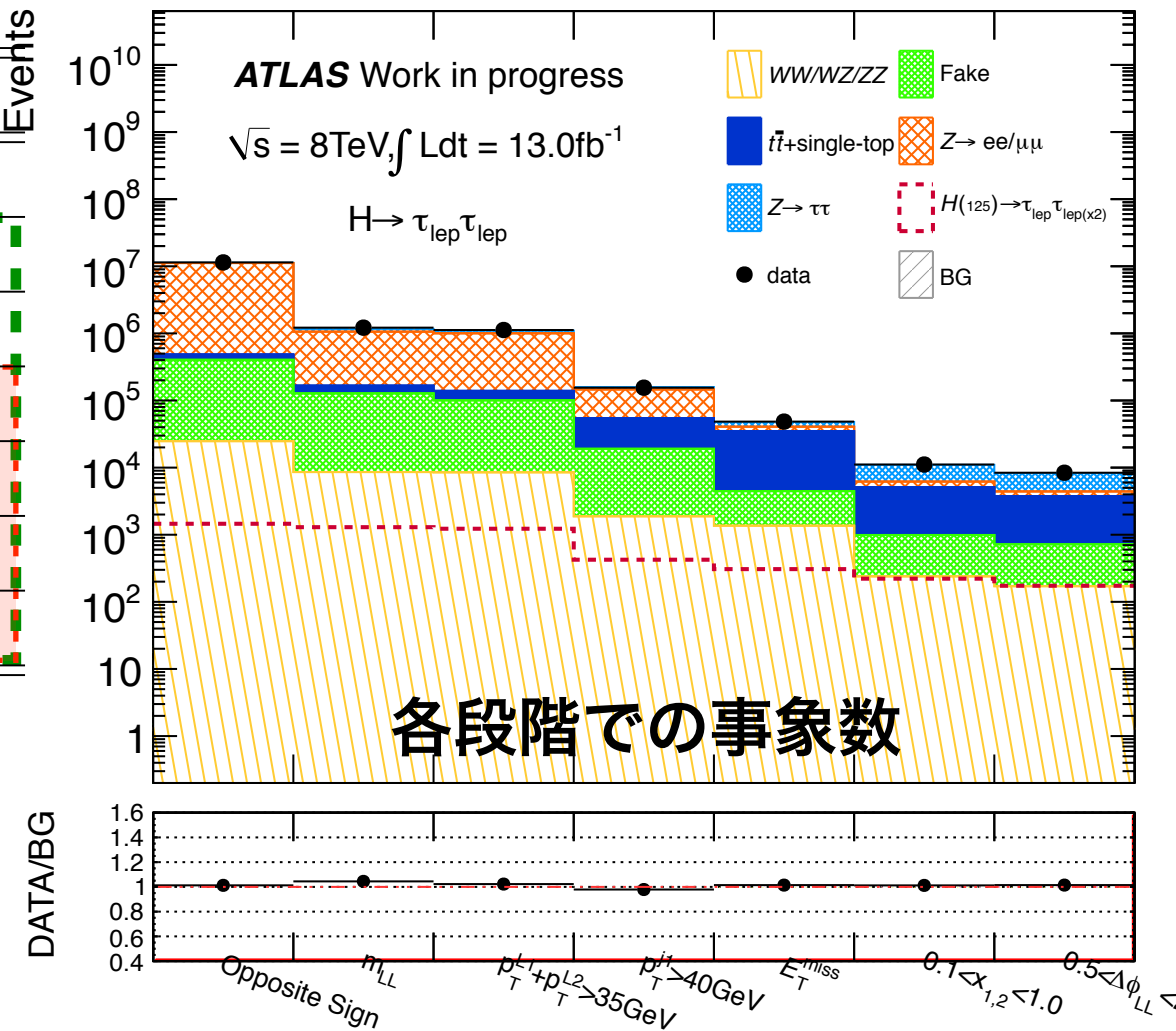
事象選択

- 本解析の事象選択は, トリガー(dilepton, single-lepton trigger)の後に,
 - 前段階と, 4つのSRのカテゴリゼーション(信号をenhanceする厳しいセレクション)
- 事象選択の前段階において重要なことは,
 - **Signal Topologyの選択**と **$Z \rightarrow ee/\mu\mu$ や大きな系統誤差を持つFake lepton事象の排除**

Cut	$ee + \mu\mu$	$e\mu + \mu e$	Events
Cut1	Pre-selection: exactly two leptons with opposite signs		
Cut2	$30 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 75 \text{ GeV}$	$30 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 100 \text{ GeV}$	
Cut3	$p_T^{\ell 1} + p_T^{\ell 2} > 35 \text{ GeV}$		
Cut4	$p_T^{j1} > 40 \text{ GeV}$		
Cut5	$E_T^{\text{miss}} > 40(20) \text{ GeV}$	$E_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$	
Cut6	$0.1 < x_{1,2} < 1.0$		
Cut7	$0.5 < \Delta\phi_{\ell\ell} < 2.5$		

- 選択効率(Cut1 → Cut7の比)はそれぞれ
 - 背景事象 → 約0.1%,
 - 信号事象(赤点線) → 10%程度

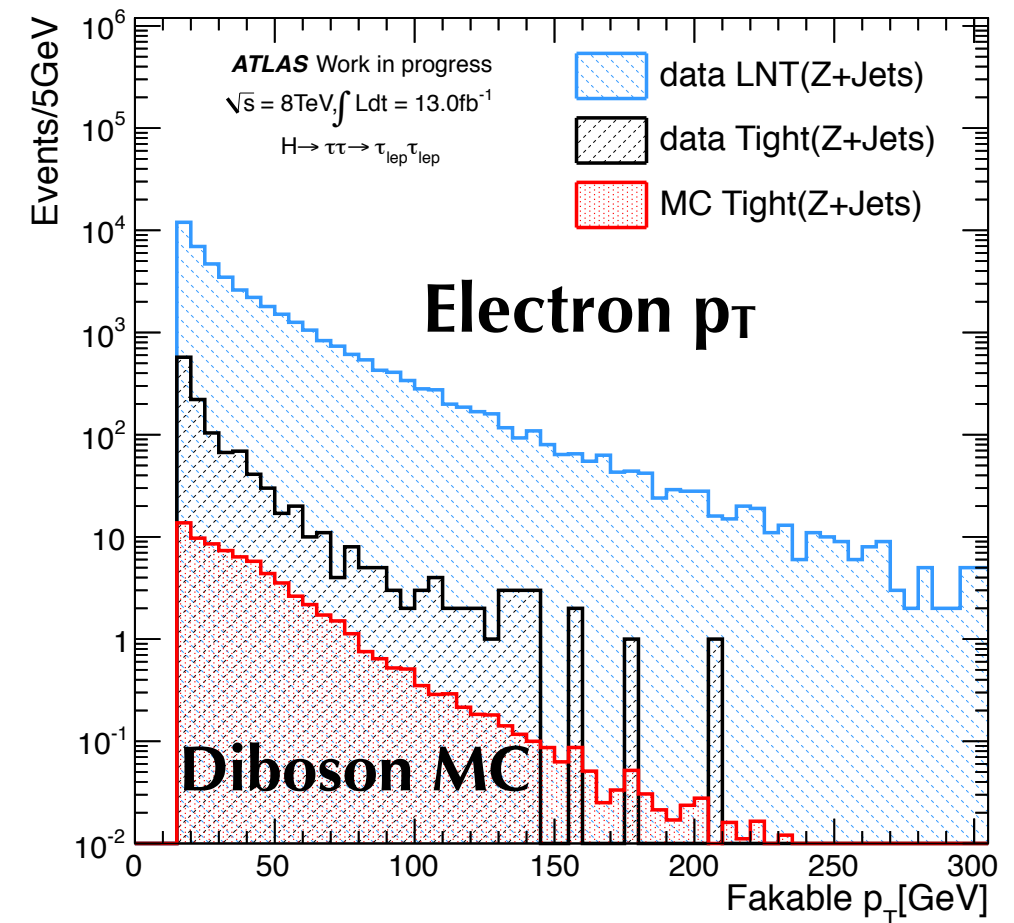
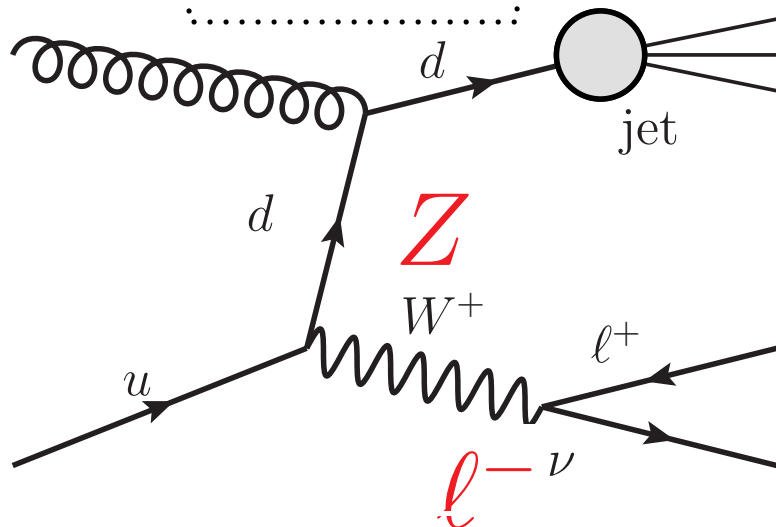
- 観測データと背景事象の見積もりはどの段階でも良く一致している。



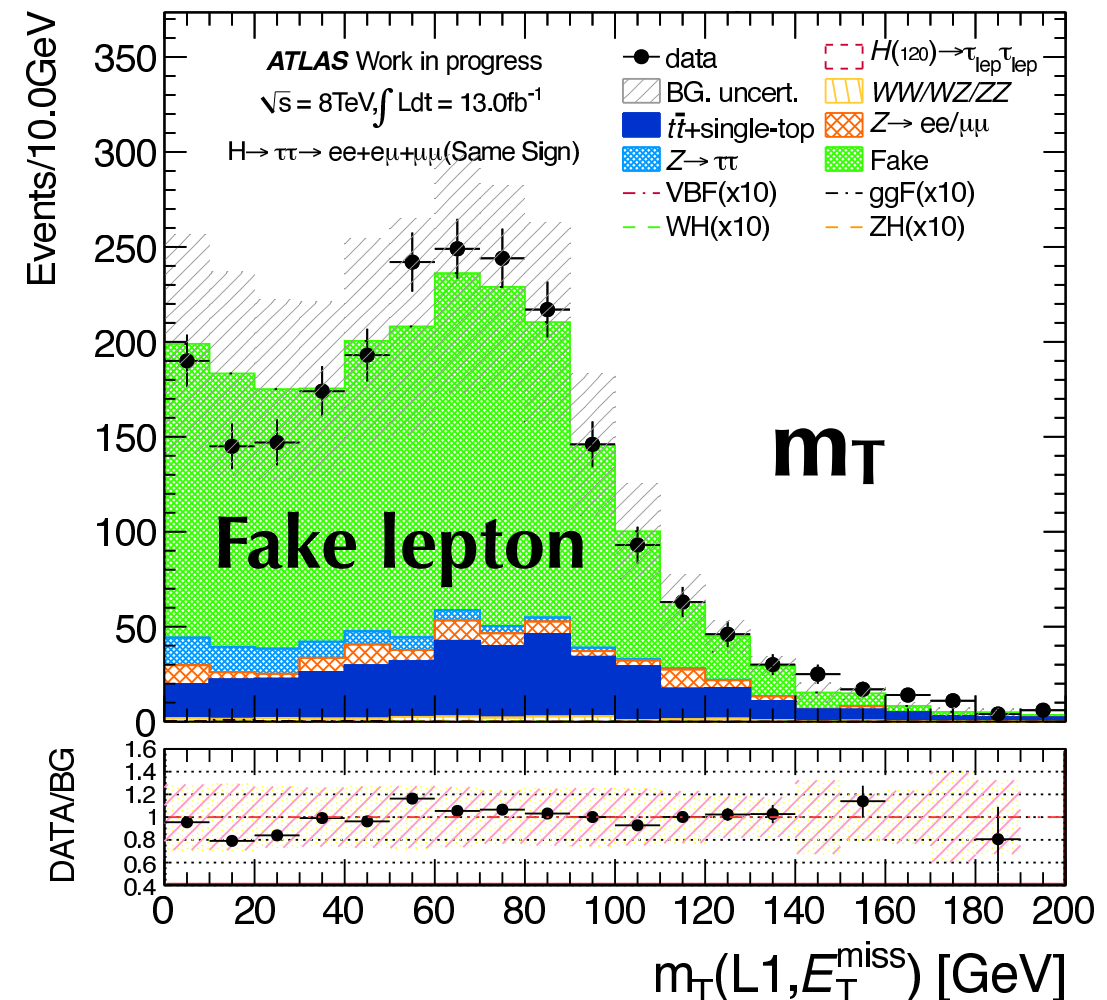
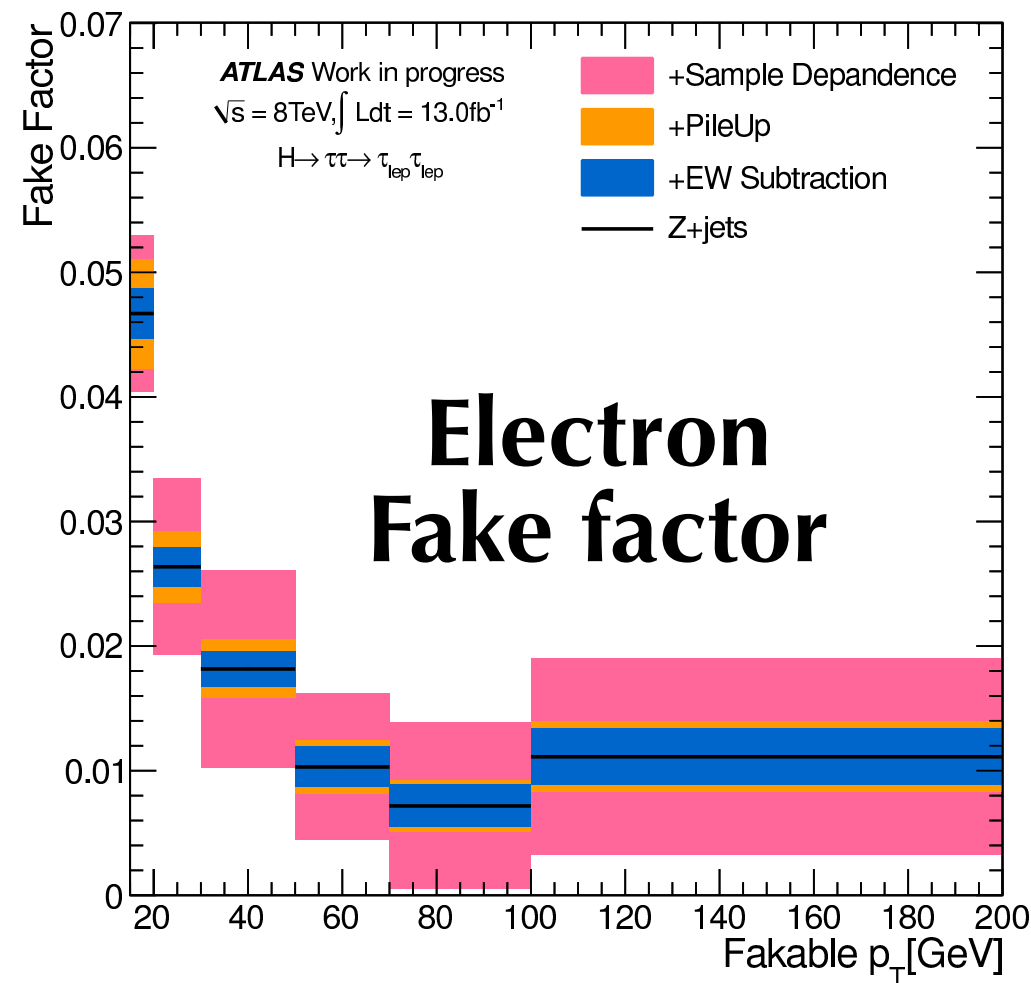
Fake lepton事象の見積もり

- **Fake lepton事象**: Heavy flavorクォークからのnon-prompt leptonやjetが誤同定される事象
 - W+jets: W bosonからのreal leptonとjet→fake leptonの誤同定
 - QCD multi-jet: 生成断面積が非常に大きいですが, fake lepton事象は少ない(2本fakeなため).
- **Fake factorを用いてFake lepton controlサンプルの規格化を行う.**
 - Fake factorの測定: 観測データのZ+jets事象を用いて→jetの組成(quark/gluon)が同じ
 - LNT: 条件を緩めたlepton→Fake leptonをenhanceする.
 - 低い p_T のFake leptonが多い→Fake factorは p_T 依存性を考慮.
 - Real lepton: Diboson事象をMCから見積もり引いてやる.

$$N_{\text{Fake}}^{\text{Est.}} = \frac{N_{\text{Tight}}}{\underbrace{N_{\text{LNT}}}_{\text{Fake Factor}}} \times \underbrace{N_{\text{Tight+LNT}}^{\text{Fake CR}}}_{\text{Fake CR}}$$



Fake lepton事象の見積もり

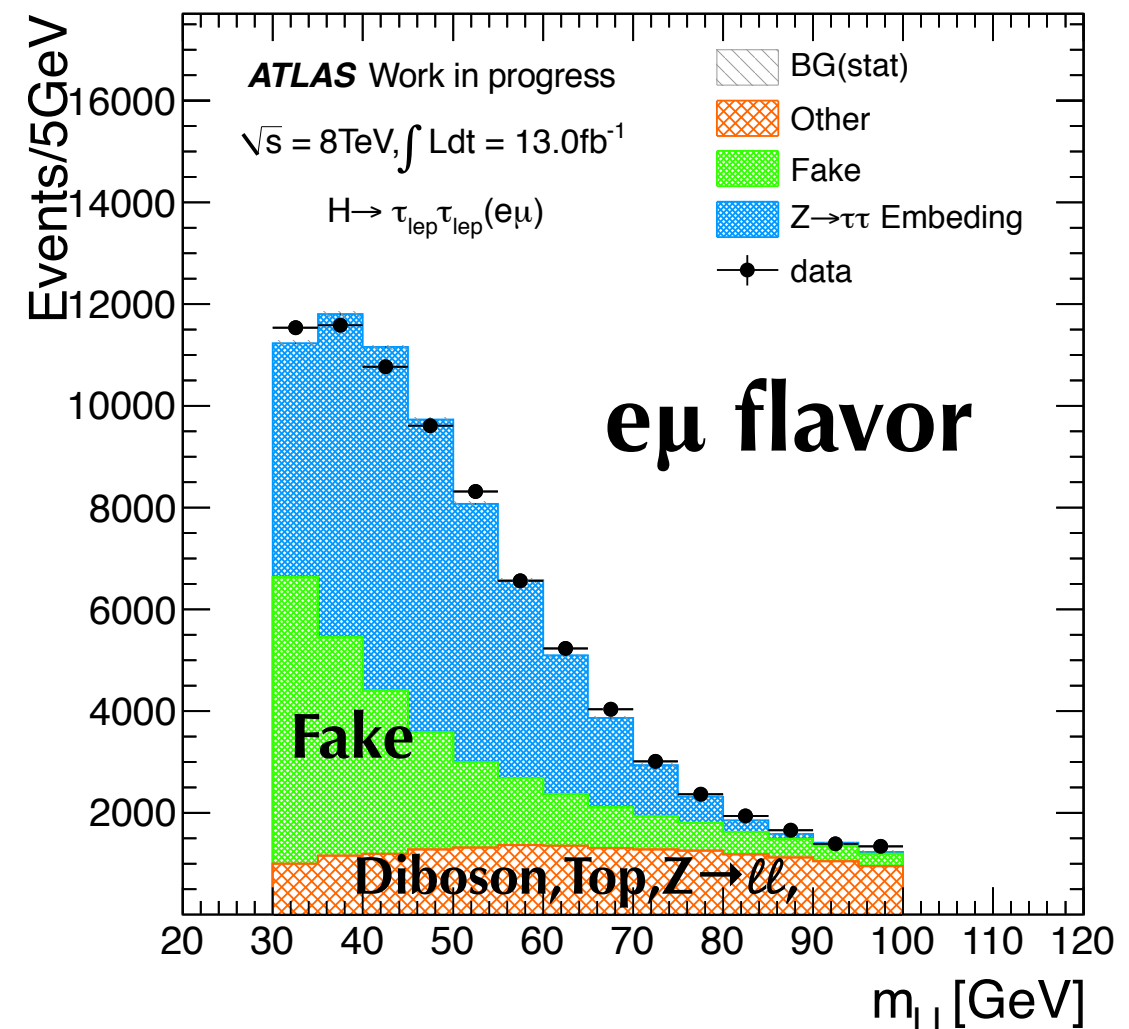
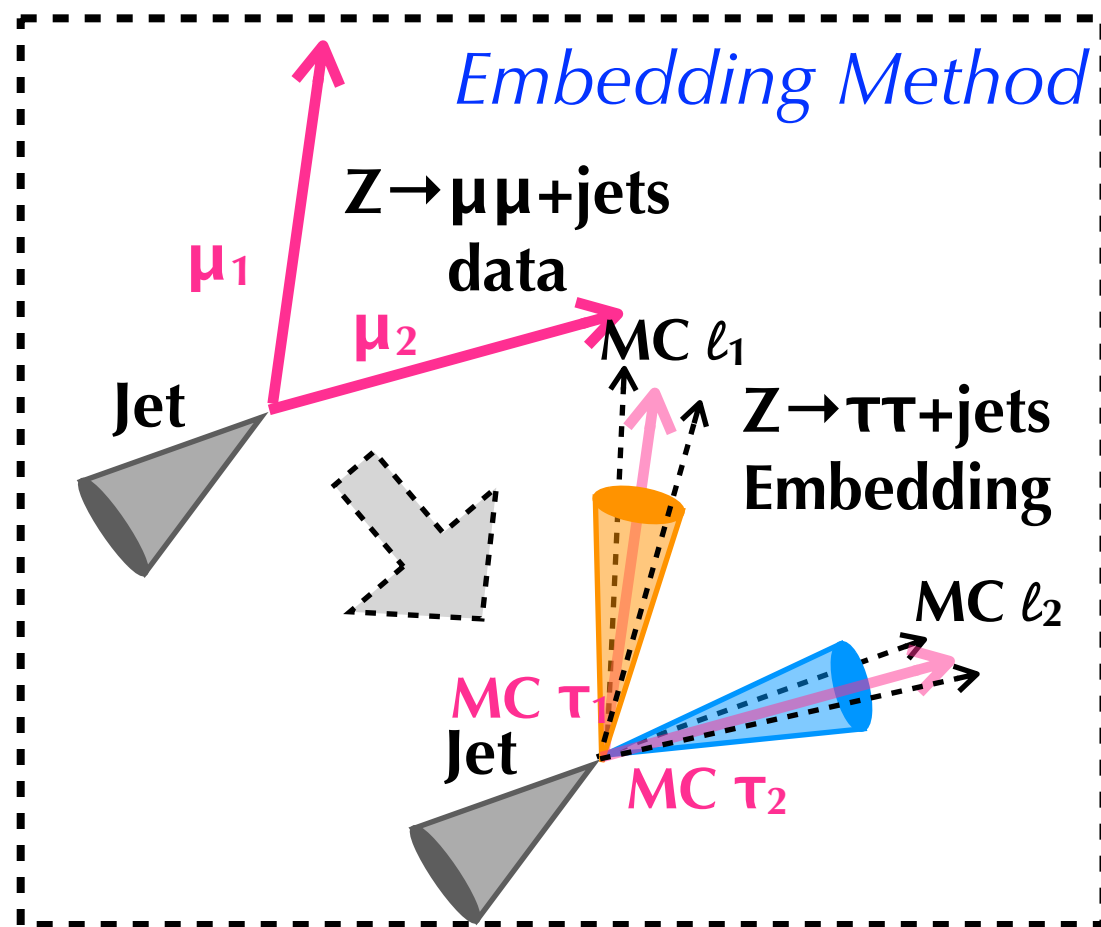


- Fake factorの系統誤差として, **Real leptonの寄与**, **Z/W+jetsの依存性**, **Pile-up**を考慮した
- Same sign事象での確認→Opposite Sign事象に比べて他の背景事象の割合が少ない
 - 観測データをよく再現している.
- 系統誤差は, Fake factorを $\pm 1\sigma$ で動かした場合のSRでの事象数の差異を考慮→約40%

$$m_T = \sqrt{2p_T \cdot E_T^{\text{miss}} \cdot (1 - \cos(\Delta\phi_{\ell, E_T^{\text{miss}}}))}$$

$Z \rightarrow \tau\tau$ の見積もり

- $Z \rightarrow \tau\tau$: irreducibleであるため系統誤差を小さくする→Embedding method
- 観測されたデータで $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象のmuonをsimulated tau leptonに置き換えて再構成。
 - 観測データを用いるので, Jetの作る E_T^{miss} の不定性やjetそのものの不定性を考慮しなくて良い。



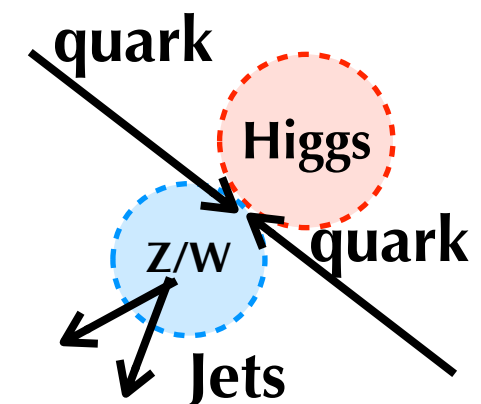
- 規格化は $Z \rightarrow \tau\tau$ MCと観測データを用いる: 他の背景事象が正しいことが重要。
 - 規格化に関する系統誤差は5%程度。
- $e\mu$ flavorで大きな背景事象→観測データをよく再現している。

カテゴリーゼーション

- 本解析では,Higgs粒子の生成過程に応じて4つのSRを設定する.

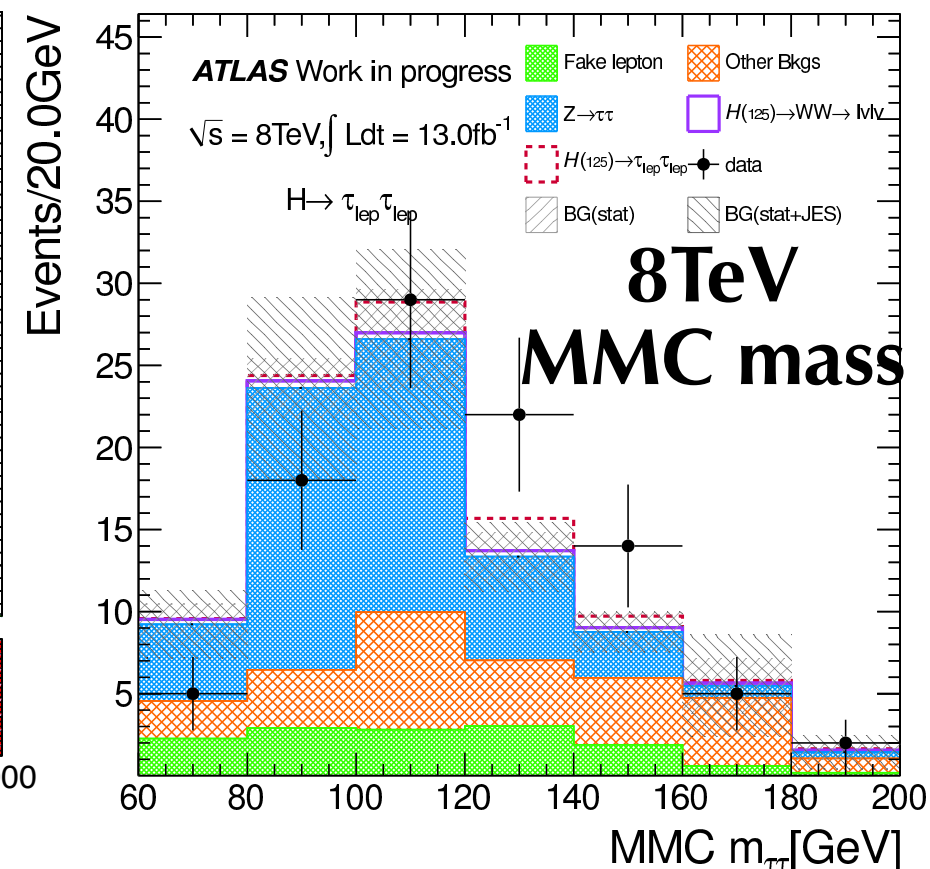
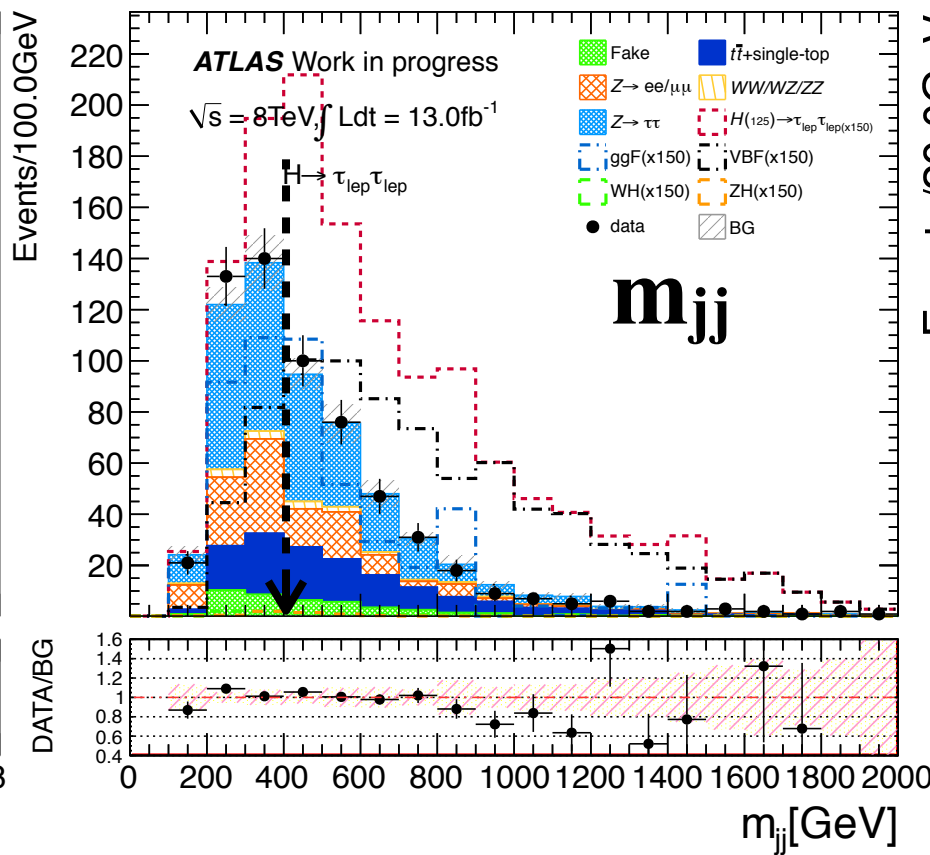
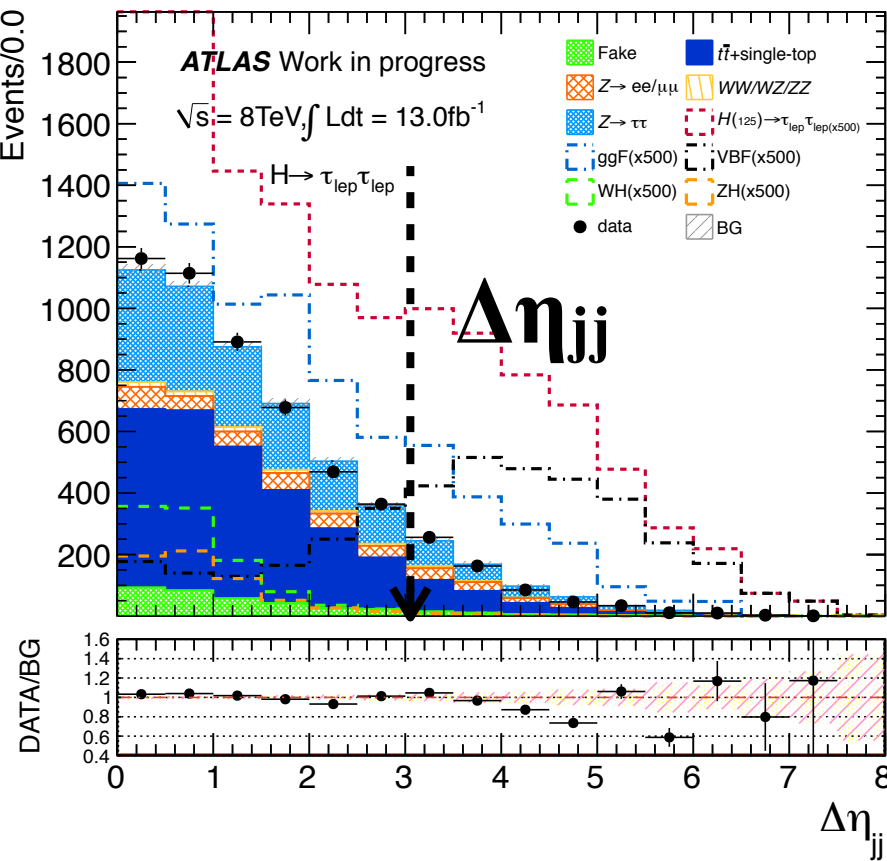
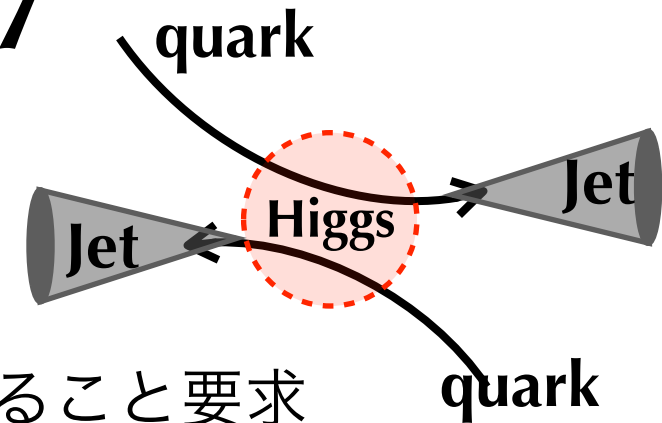
Category	2jet VBF	Boosted	2jet VH	1jet
		Pre and Event selection		
Cut8	$p_T^{j2} > 25 \text{ GeV}$	failed VBF	failed Boosted	failed VH
Cut9	$\Delta\eta_{jj} > 3.0$	$p_T^{\tau\tau} > 100 \text{ GeV}$	$p_T^{j2} > 25 \text{ GeV}$	$m_{\tau\tau j} > 225 \text{ GeV}$
Cut10	$m_{jj} > 400 \text{ GeV}$	b -tagged jet veto	$\Delta\eta_{jj} < 2.0$	b -tagged jet veto
Cut11	b -tagged jet veto	-	$30 \text{ GeV} < m_{jj} < 160 \text{ GeV}$	-
Cut12	CJV and OLV	-	b -tagged jet veto	-

- **2jet VBF SRが最も重要:**このSRから順にBoosted→2jet VH→1jetと分類される.
 - 全SRから排除された事象は,解析から完全に取り除く.
- 2jet VBF,Boostedカテゴリーは後述する.
- **2jet VH SR:** W/Z bosonがhadronic崩壊しjetが2つ観測される事象
 - 2jetが近接しその不変質量が,W/Zの質量に近いことを要求する.
- **1jet SR:** ggF過程で ISR jetがいる事象を選択する.



2jet VBF category

- $\Delta\eta_{jj} > 3.0$, $m_{jj} > 400 \text{ GeV}$: VBF signalは, high p_T jetが超前後方に出る
- CJV and OLV: → タグした2jetにはカラーのつながりはない
 - Central Jet Veto: 2jetの間(η 方向)に他のjetがないこと要求
 - Outside Lepton Veto: leptonがどちらもタグした2jetの間(η)にいること要求
- b-tagged jet veto: Top事象を排除する



- 100~140GeVのビンに大きなexcess: 重要なこと→MMC massのモデリング, jet kinematics
 - $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ の信号事象, 各背景事象のCRでの確認, $Z \rightarrow \tau\tau$ のモデリングをMCを用いてチェックし見積もりは妥当だと判断

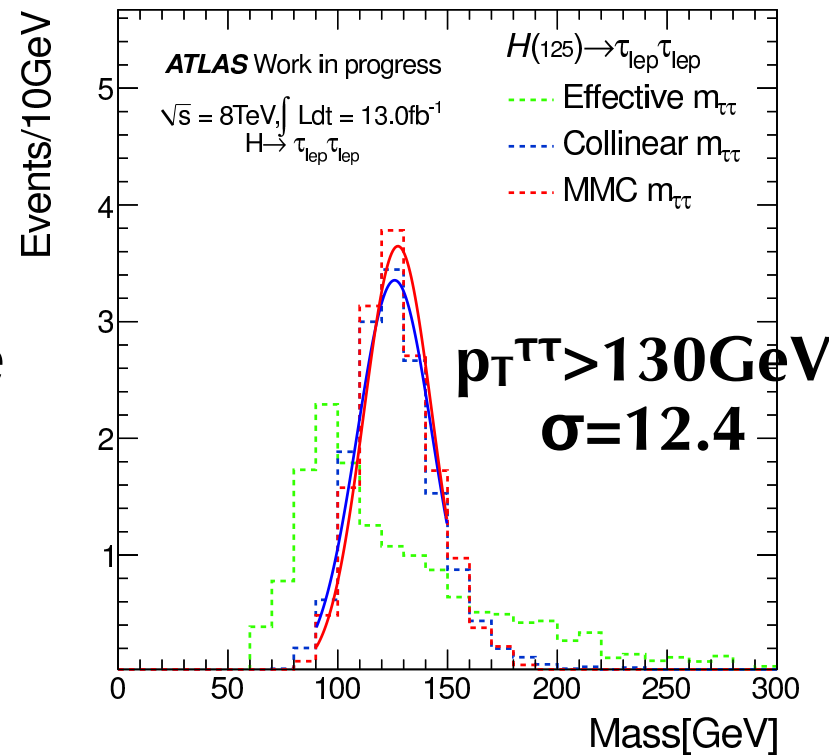
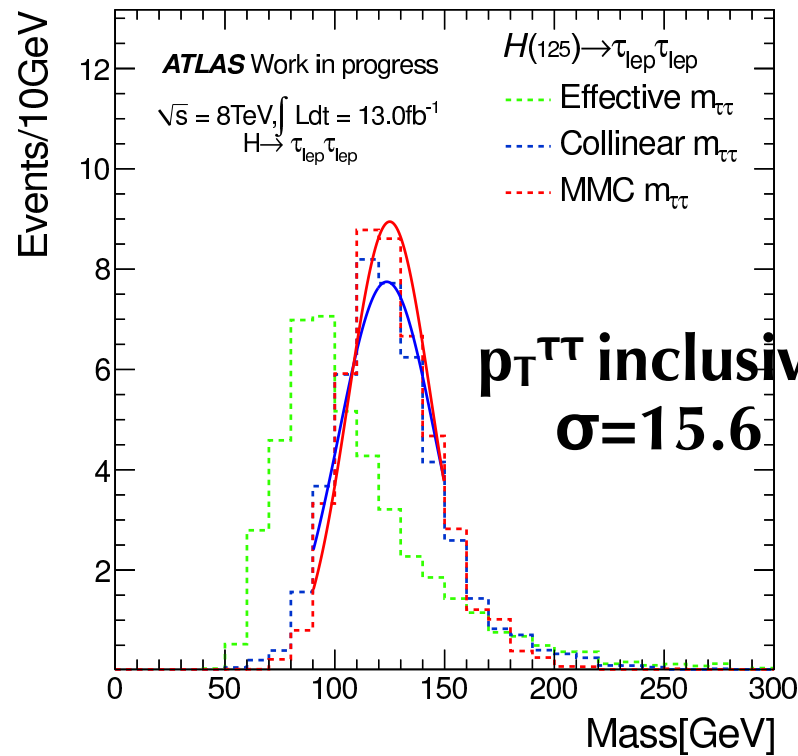
Boosted category

- $p_T^{\tau\tau} > 100 \text{ GeV}$: Higgs粒子がブーストした信号事象を選択.

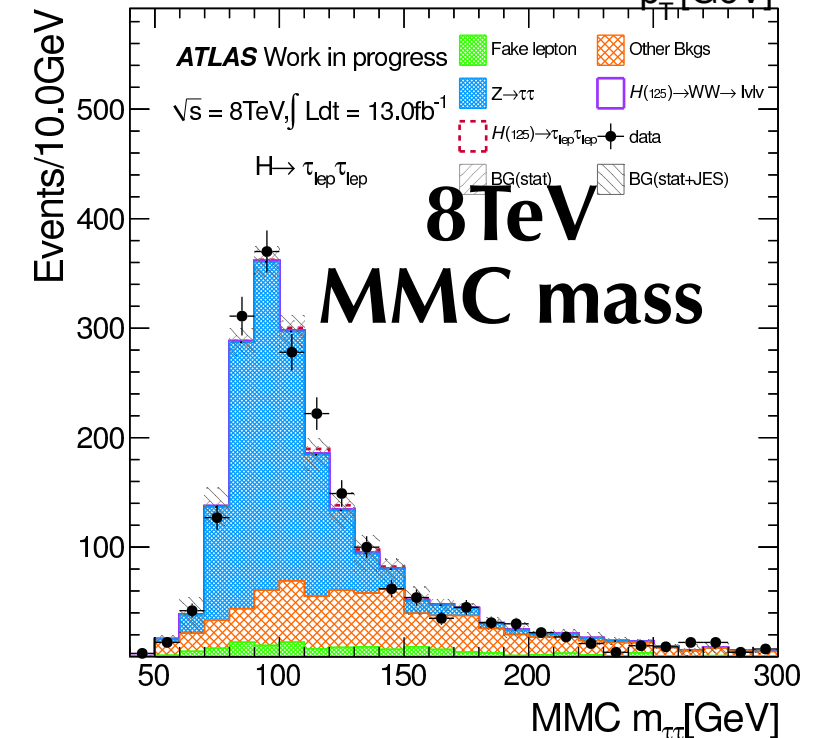
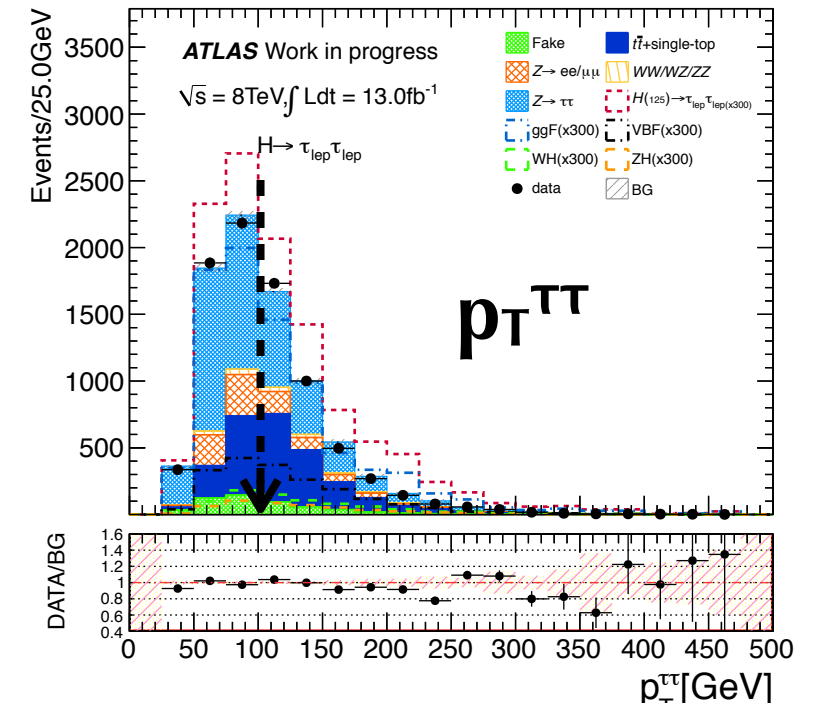
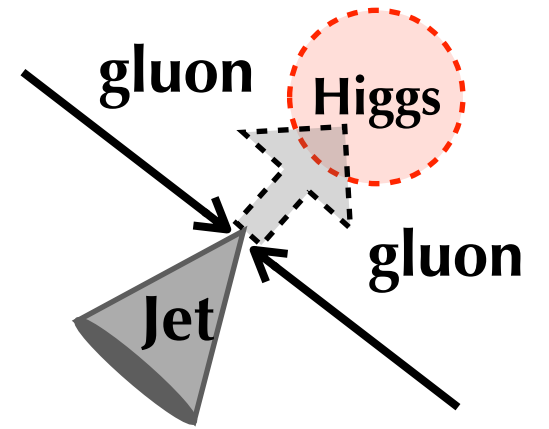
$$\vec{p}_T^{\tau\tau} = \vec{p}_T^{\ell_1} + \vec{p}_T^{\ell_2} + \vec{E}_T^{\text{miss}}$$

- 質量分解能が向上し, S/Bが改善する.

- 2つの場合で質量分布をガウシアンフィットした



- 質量分解能が約20%向上!!
- $Z \rightarrow \tau\tau$ ピークの左に Excess: $p_T^{\tau\tau}$ のモデリング, MMC shape
 - $Z \rightarrow \text{tautau}$ MC を用いてチェックし, Embedding による見積もりは妥当だと判断した



系統誤差とProfile Likelihood

- MCにおけるJet Energy Scaleの不定性が最も大きな系統誤差:

- jetのエネルギーについて5~20%程度の不定性が信号/背景事象の両方に生じる.
- 他のSRからの流入が起こるため,分布形状の違いも考慮した

- **Profile Likelihood Fit:** Nuisance ParameterをProfileして最も大きいLikelihoodを探す

- 信号強度 μ をフィットから求める.
- 系統誤差をNuisance Parameters θ としたLikelihoodを構築.
$$\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_j \text{Pois}(N_j | \mu s_j + b_j) \times \prod_{\theta} G(t | \theta, 1)$$
- Nuisance Parameter: 系統誤差の大きさの事象数,分布を変化させるパラメタ

- **検定量:** μ の関数で, ベストフィット $\hat{\mu}$ と各 μ の比
$$\tilde{q}_{\mu} = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\text{data} | \mu, \hat{\theta}_{\mu})}{\mathcal{L}(\text{data} | \hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

- **CLs制限:**

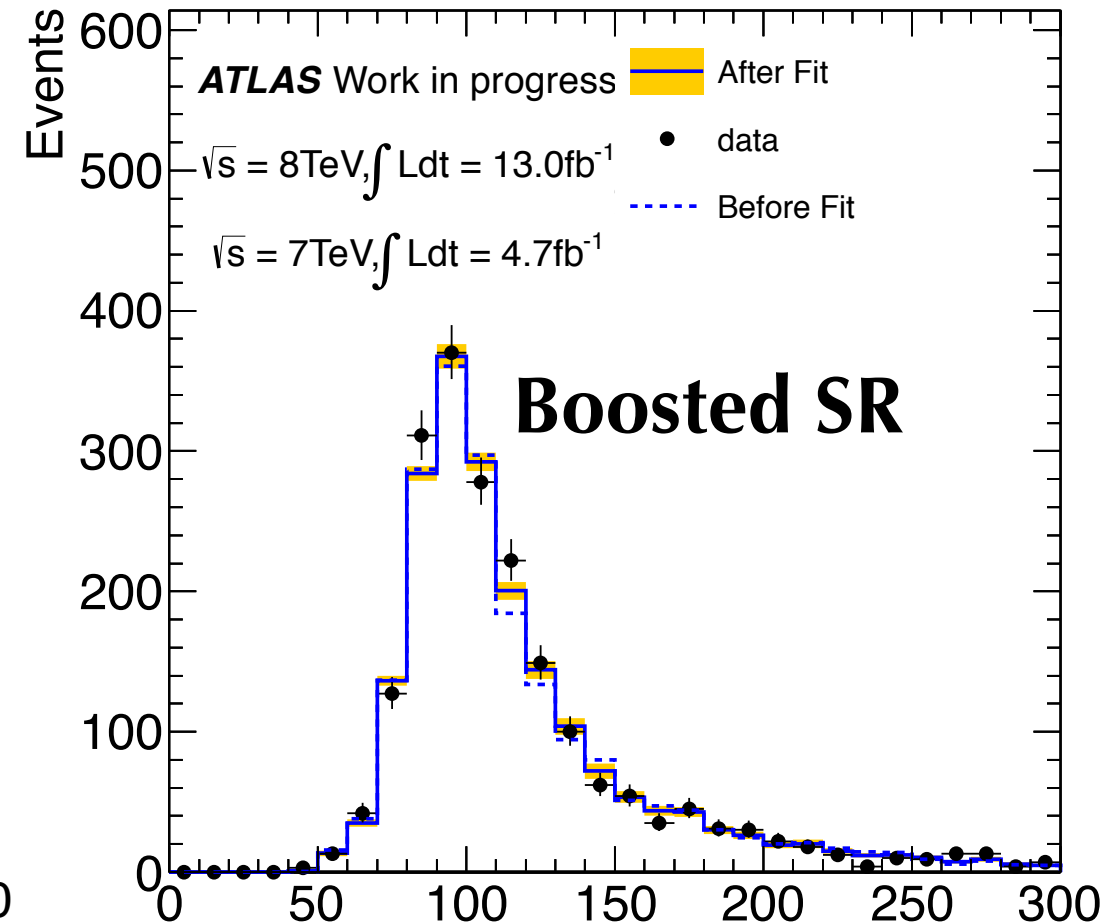
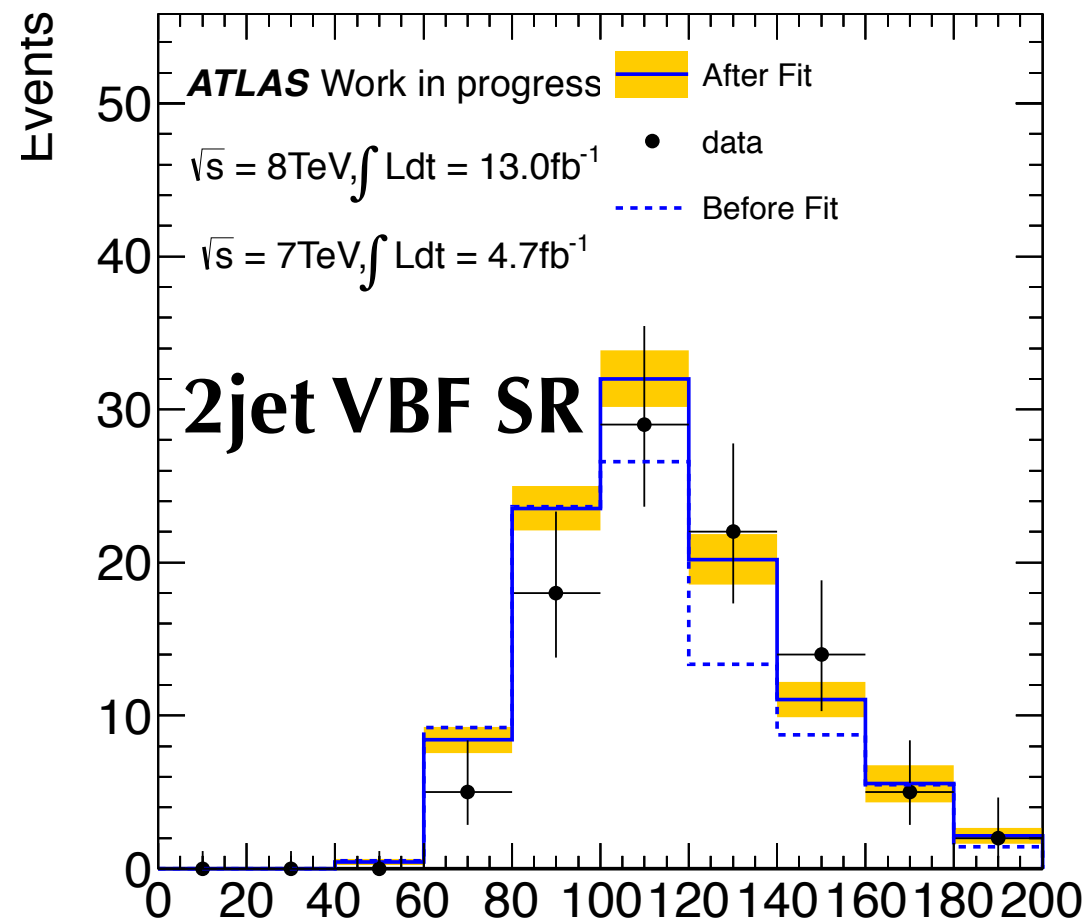
- bkg-onlyもしくはSig+bkgの検定量分布を用いる.
- 信号事象が少ない場合,robustな方法.

$$CL_S(\mu) = \frac{p_{\mu}}{1 - p_b}$$

系統誤差	信号事象	背景事象
Trigger Scale	~2%	~4%
Electron	~2%	~5%
Muon	~1%	~1%
Jet	~25%	~15%
規格化	26,10%,	~3%
Luminosity	3.6%	3.6%

Profile Likelihood Fit結果

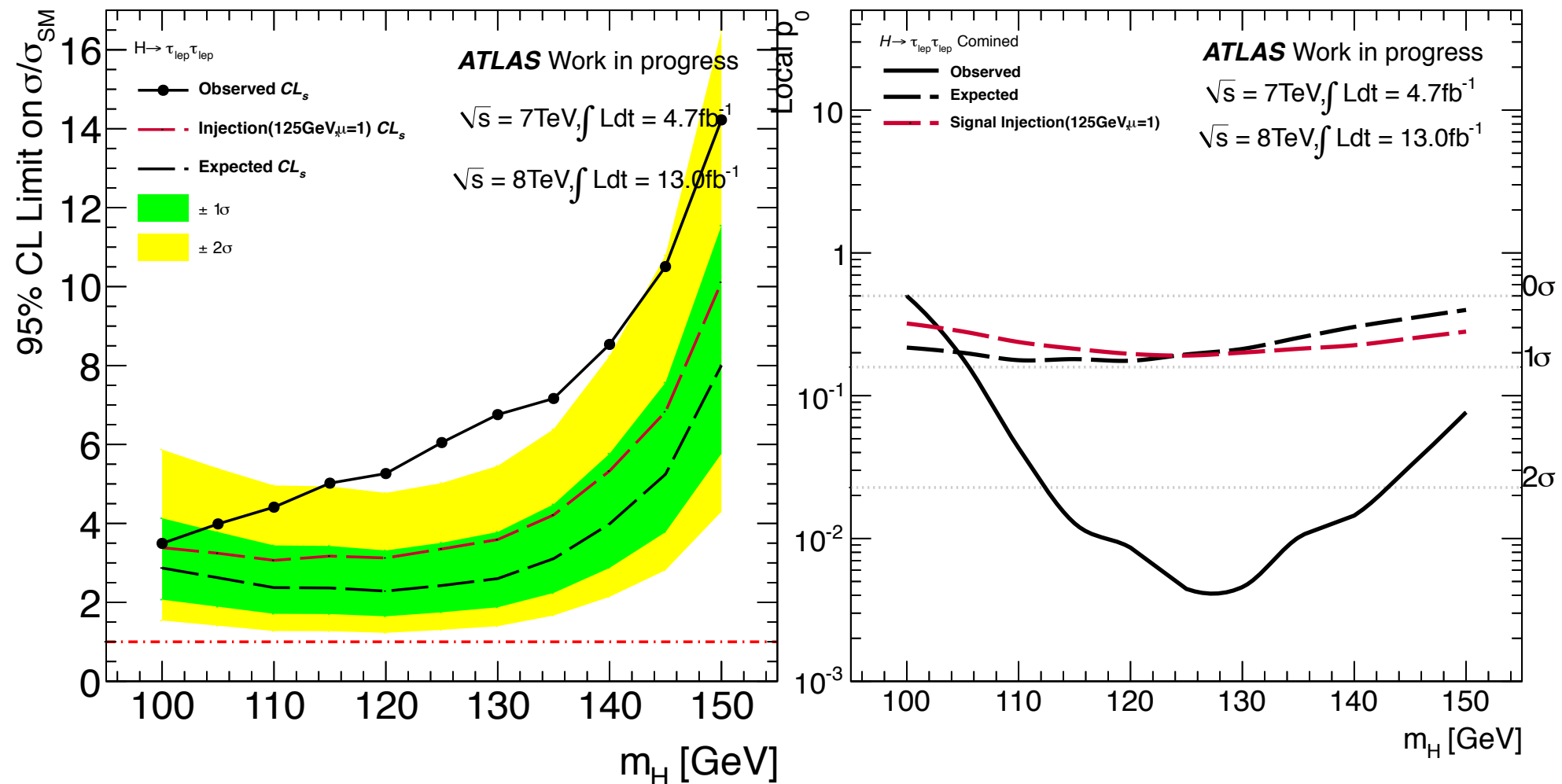
- Profile Likelihood Fit: 全てのSRの質量分布を同時フィットした結果,
 - 信号強度 $\mu=2.8$ でベストのフィット結果を得た.



- 青点線: フィット前, 青実線: フィット後の見積もり
- 黄色バンド: フィットで得られたNuisance Parameter(系統誤差)の $\sqrt{2}$ 乗和
- このFit結果を使ってCLs制限を付ける.

CL_s制限と超過事象の優位性

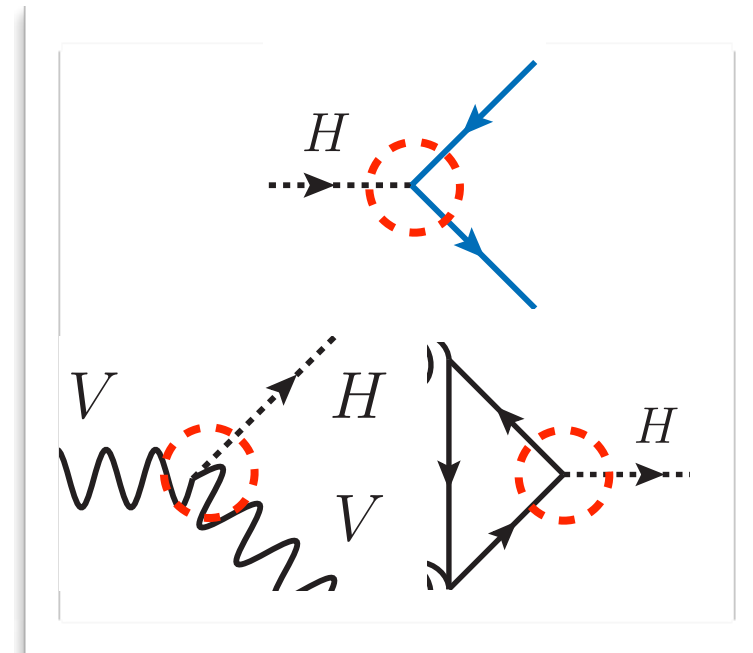
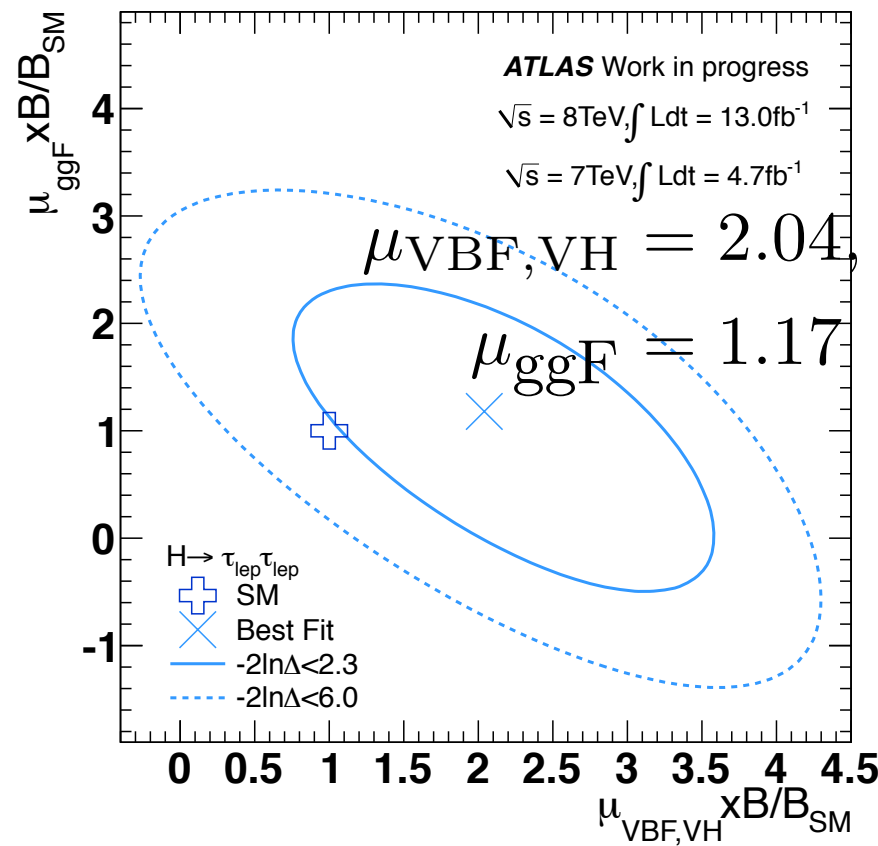
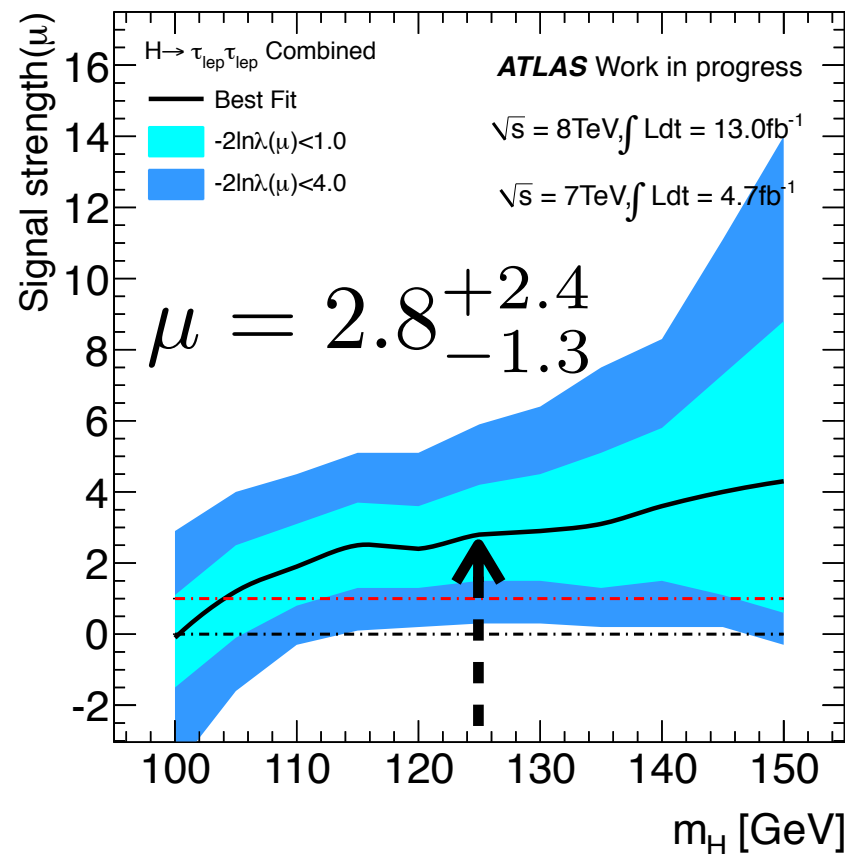
- 全てのカテゴリーをCombineしたCL_s Limitとlocal p-value



- 赤点線: $m_H=125\text{GeV}$ の信号事象がそれぞれの質量領域でどのように観測されるか。
 - 質量分解能は良くないため, 広範囲に超過が観測される。
- 期待される発見感度は 1σ 程度であった。
- $m_H=125\text{GeV}$ に対して約 2.6σ の超過を観測したが, まだ統計的に有意ではない。

信号強度の測定結果

- 信号強度 μ から湯川カップリングの測定を行った.
- Higgs粒子の断面積が標準模型と等しいと仮定 $\rightarrow \mu = (Y_\tau/Y_\tau^{SM})^2$ と記述できる.



- 信号強度 μ は標準模型の2.8倍 $\rightarrow$ Higgs粒子と τ 粒子の湯川カップリングは標準模型に比べて

$$Y_\tau/Y_\tau^{SM} = 1.6^{+0.3}_{-0.4}$$
- 崩壊過程を $Y_\tau=1$ と仮定して,生成過程についてフィットを行った.
 - 2jet VBF SRのExcessに μ は引っ張られている.
- 湯川カップリングは生成,崩壊過程まで含めた測定が必要 $\rightarrow$ 現在結果を吟味中.

まとめと展望

- 本研究では,標準模型Higgs粒子を, $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \ell\ell + 4\nu$ チャンネルを用いて探索した.
- カテゴリゼーションを最適化し4つのSRを設定→探索感度が向上.
- 背景事象の見積もり:
 - $Z \rightarrow \tau\tau + \text{jets}$ をデータを用いて見積もり系統誤差を減少させた.
 - Fake lepton事象に対してデータを用いた方法を開発→系統誤差を約40%に抑えた.
- $m_H = 125 \text{ GeV}$ で超過を観測した,背景事象のみの場合は $2.3 \times \sigma_{\text{SM}}$.
 - 超過に対する優位性は約 2.3σ を観測したが,統計的に有意ではなかった.
- さらにデータが増えることで有意義な議論ができるようになる.
- 信号強度: 125 GeV に対して
$$\mu = 2.8^{+2.4}_{-1.3} \quad \mu_{\text{VBF,VH}} = 2.04, \mu_{\text{ggF}} = 1.17$$
- 今後の展望について,
 - 本研究では発見には至らなかった→発見には約3倍の探索感度改善が必要である.
 - 現在,探索感度向上のための手法を開発中であり,20~30%以上の改善が見込まれる.
 - データを増やし,新しい解析手法により発見を目指す.

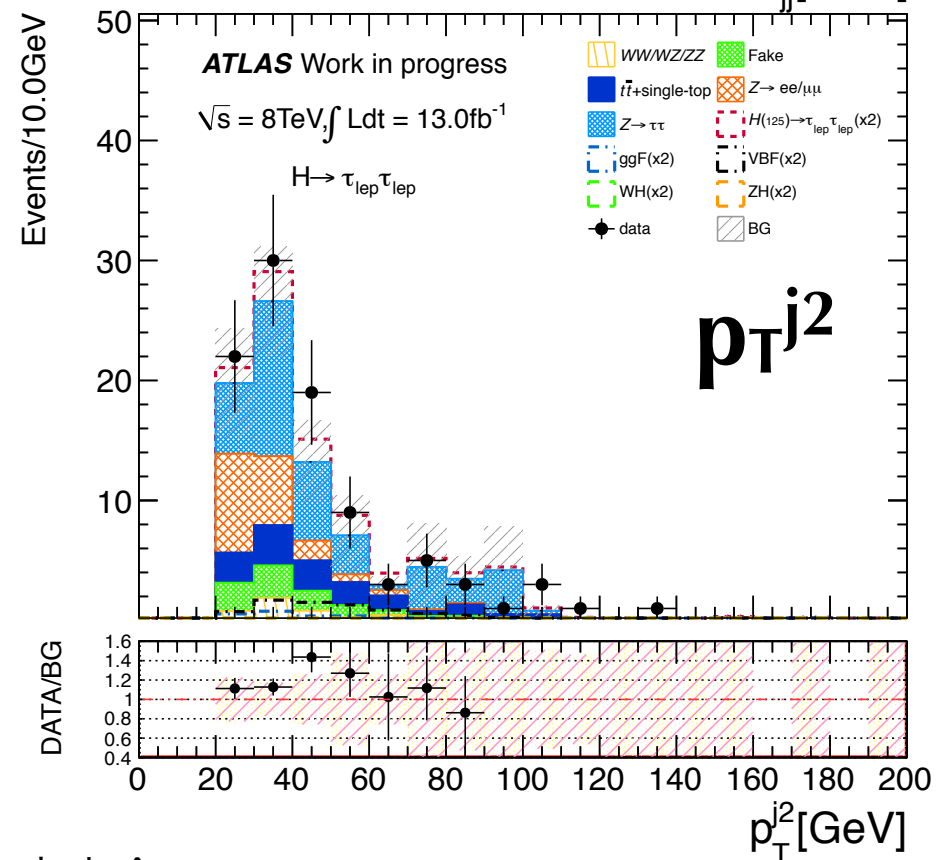
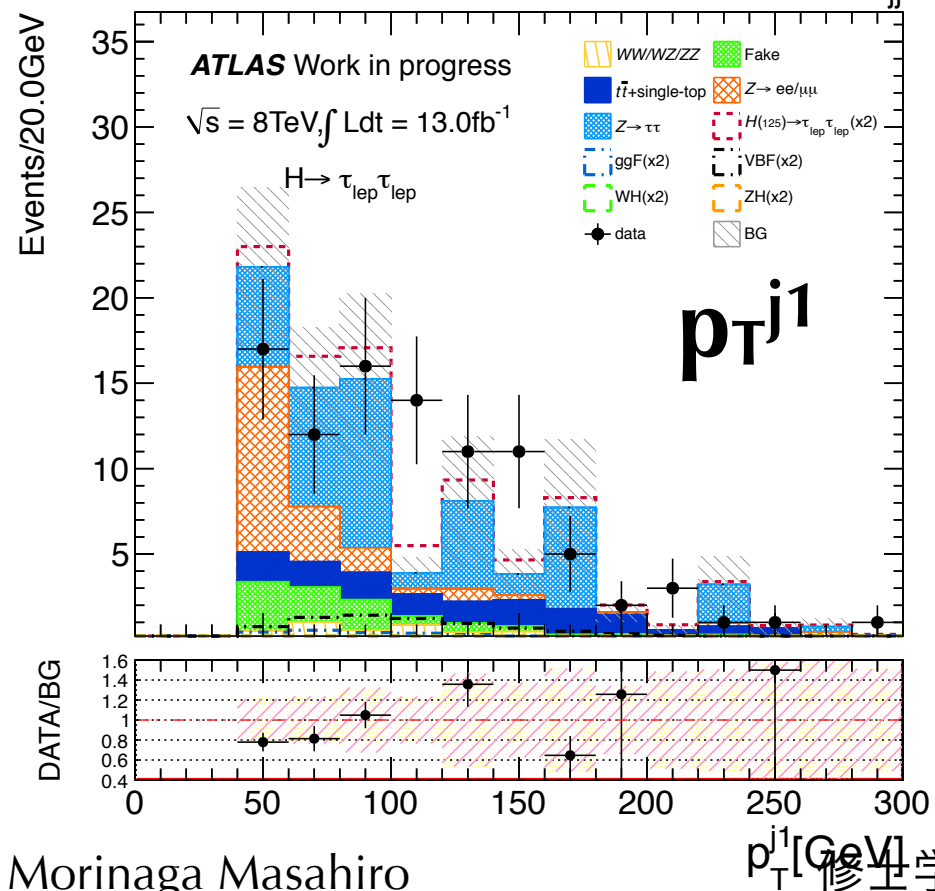
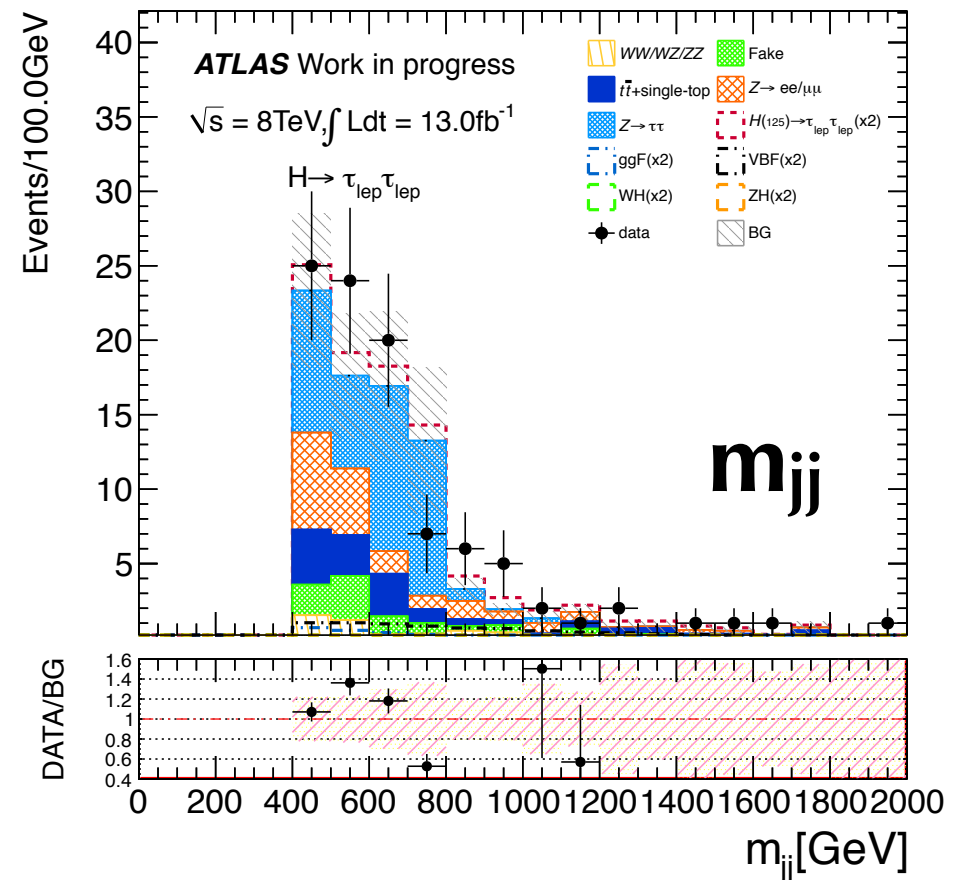
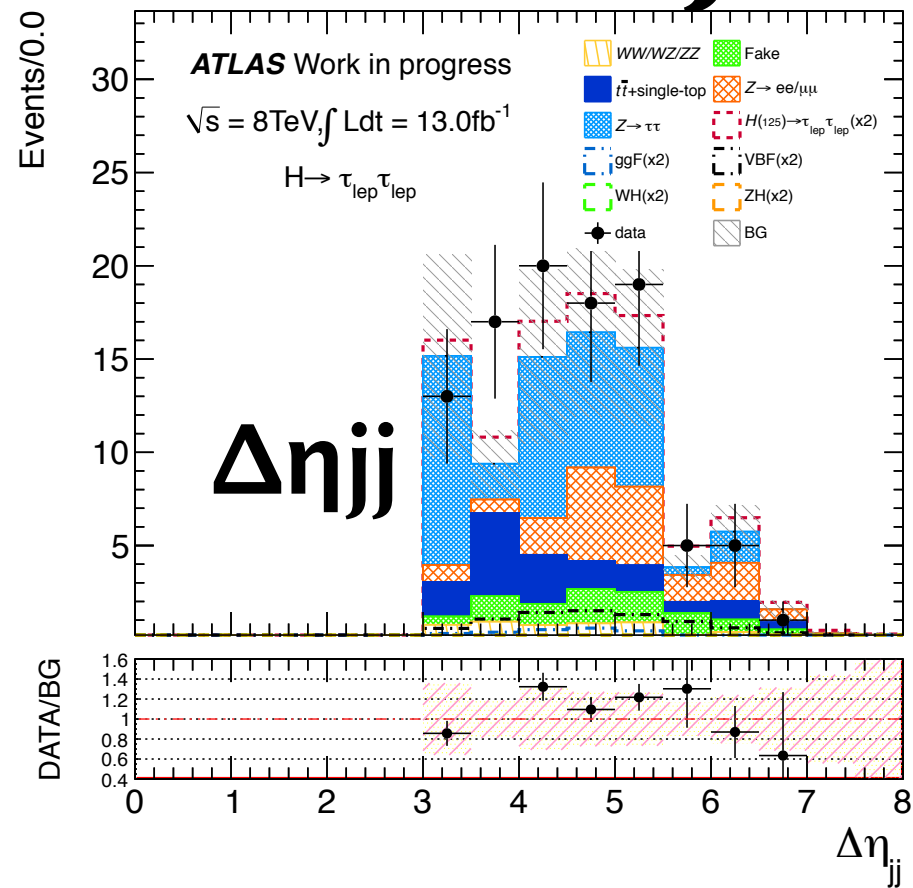
Back Up!



2jet VBF

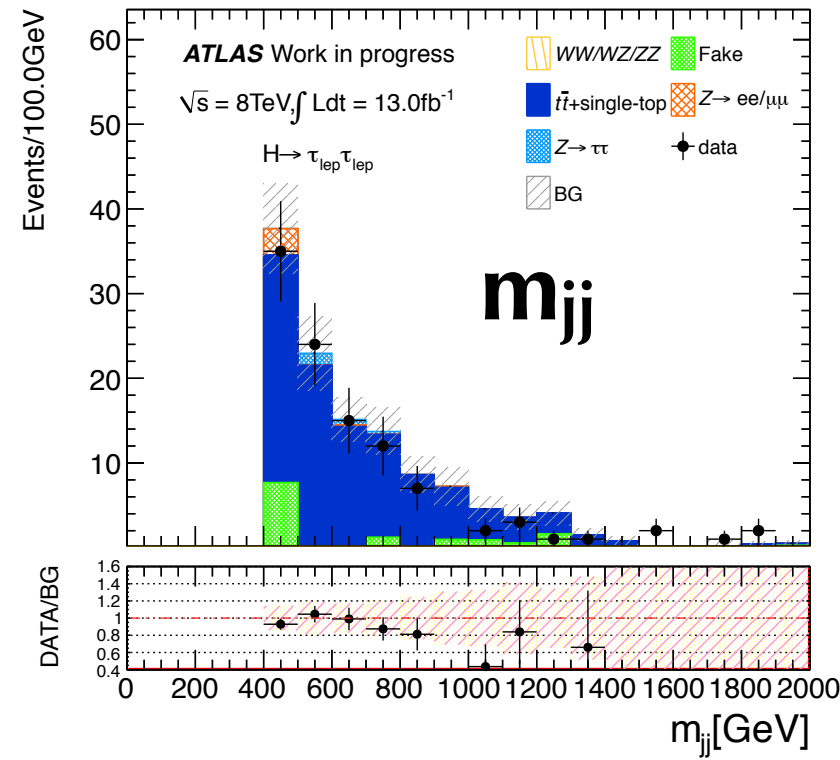
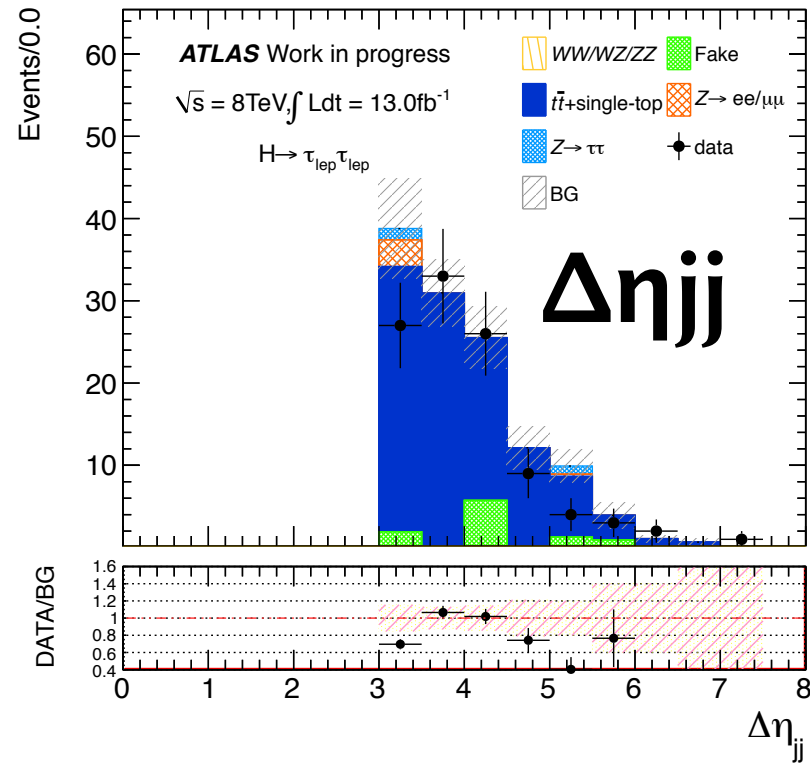
- 2jet VBF SRのExcessについて,次のことを確認した
 - MMC mass以外の,特にjetの変数についての確認
 - Top事象
 - CRでの補正と分布の確認
 - Z+jets事象
 - E_T^{miss} を用いた観測データによる補正
 - $\Delta\eta_{jj}$ を用いた観測データによる補正
 - CRでの分布の確認
 - Fake lepton事象
 - Same Sign+2jets事象を用いて分布を確認
 - $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象について,MCサンプルを用いた場合の見積り

VBF jet kinematics

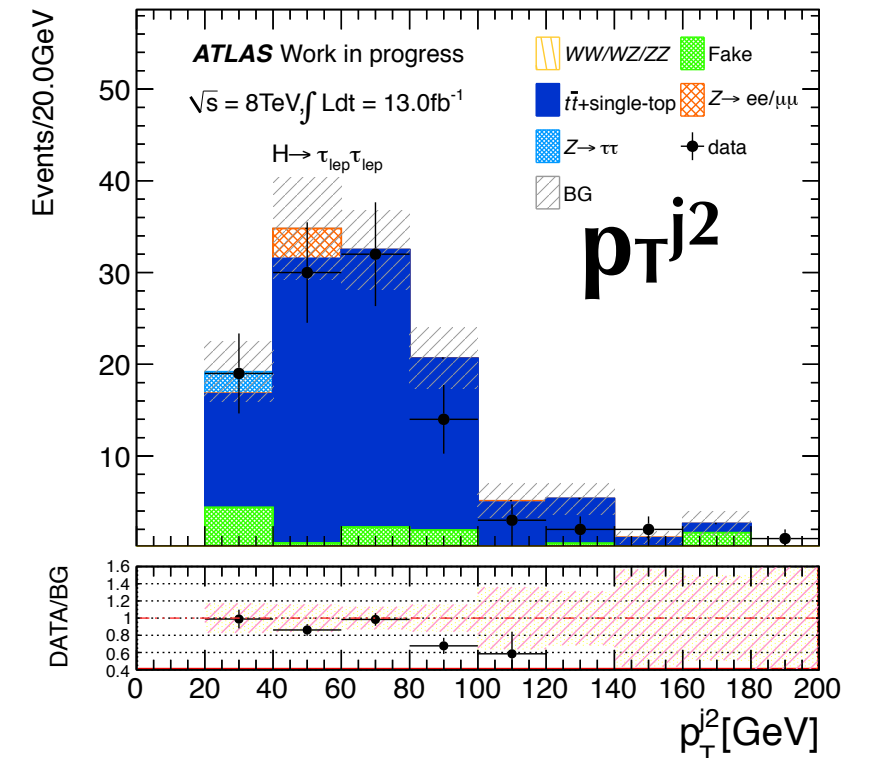
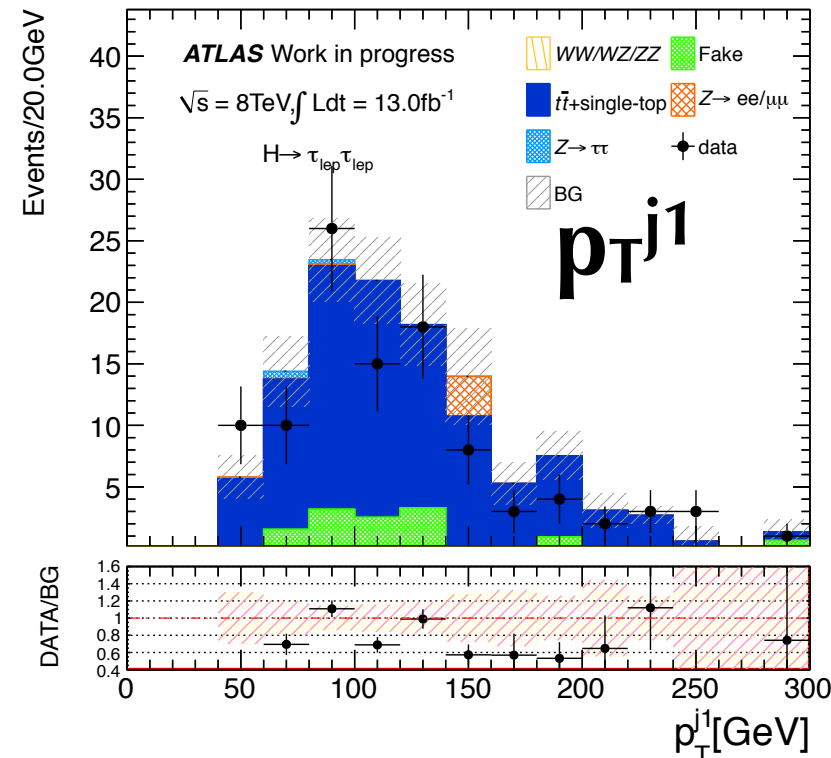
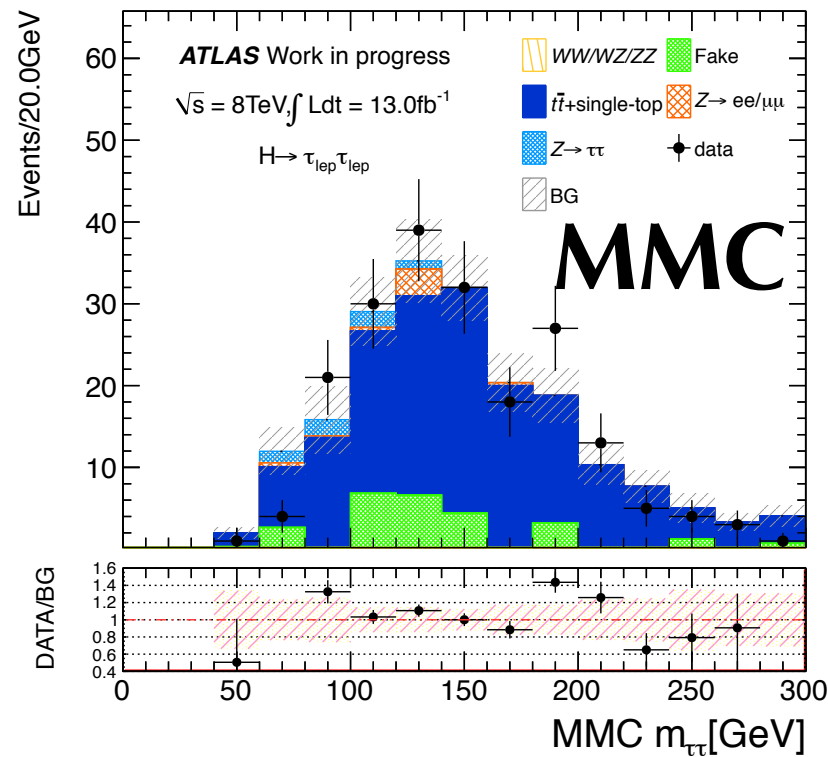


2jet VBF Top CR

- b-tagged jetを要求することで2jet VBF Top CRを設定し分布を確認した



SR	factor $\pm$ (stat) $\pm$ (syst)
VBF	$0.87 \pm 0.01^{+0.18}_{-0.25}$
Boosted	$1.12 \pm 0.05^{+0.07}_{-0.05}$
VH	$1.05 \pm 0.04^{+0.13}_{-0.16}$
1jet	$1.12 \pm 0.03^{+0.16}_{-0.12}$



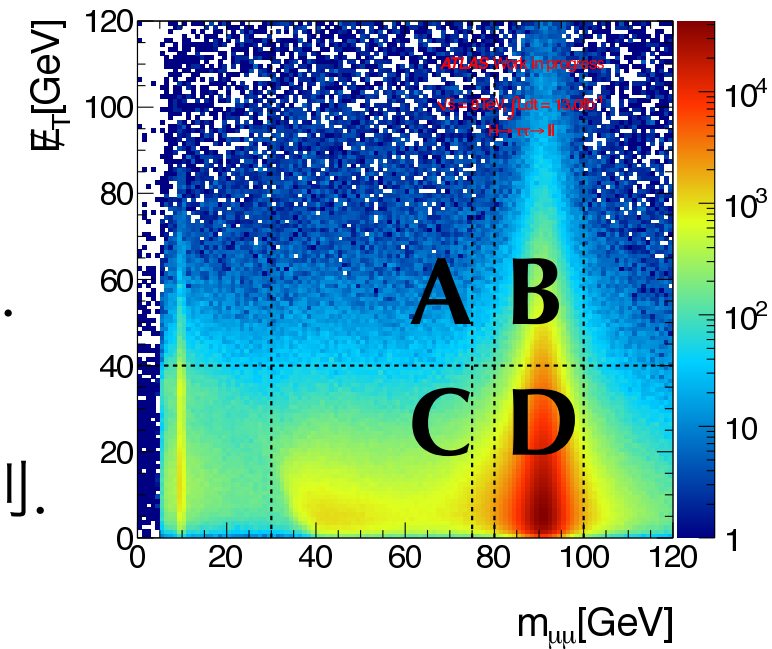
$Z \rightarrow ee/\mu\mu$ MCの補正 (E_T^{miss})

- $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ に対して,2つの補正を観測データをCRを用いて行う.
- E_T^{miss} tailの補正:Pile-upがMCに正しく入っていない→ E_T^{miss} が変化する.

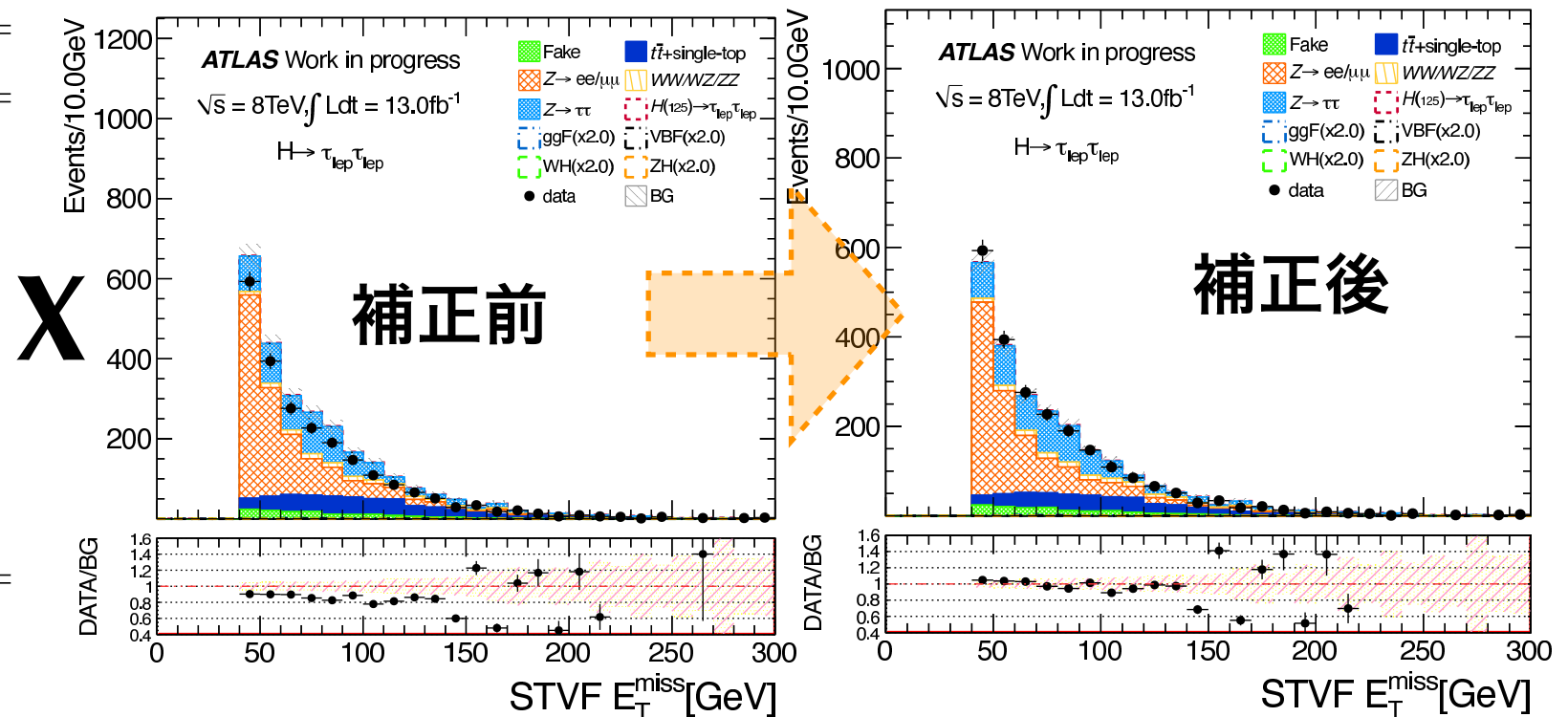
- $m_{\ell\ell}$ と E_T^{miss} の2D planeを区切って補正係数を求める.

$$A_{\text{MC}}^{\text{corr}} = A_{\text{MC}} \times \frac{B_{\text{data}}}{B_{\text{data}} + D_{\text{data}}} \frac{B_{\text{MC}} + D_{\text{MC}}}{B_{\text{MC}}}$$

- 観測データから他の背景事象の寄与を引いてMCと比較する.
- AがSignal RegionでAに補正係数をかける.
- B,C,Dは $m_{\ell\ell}$ と E_T^{miss} のカットをそれぞれの領域に合わせて選別.
- 系統誤差は E_T^{miss} の下限値(Region C,D)を変化させて見積もる.

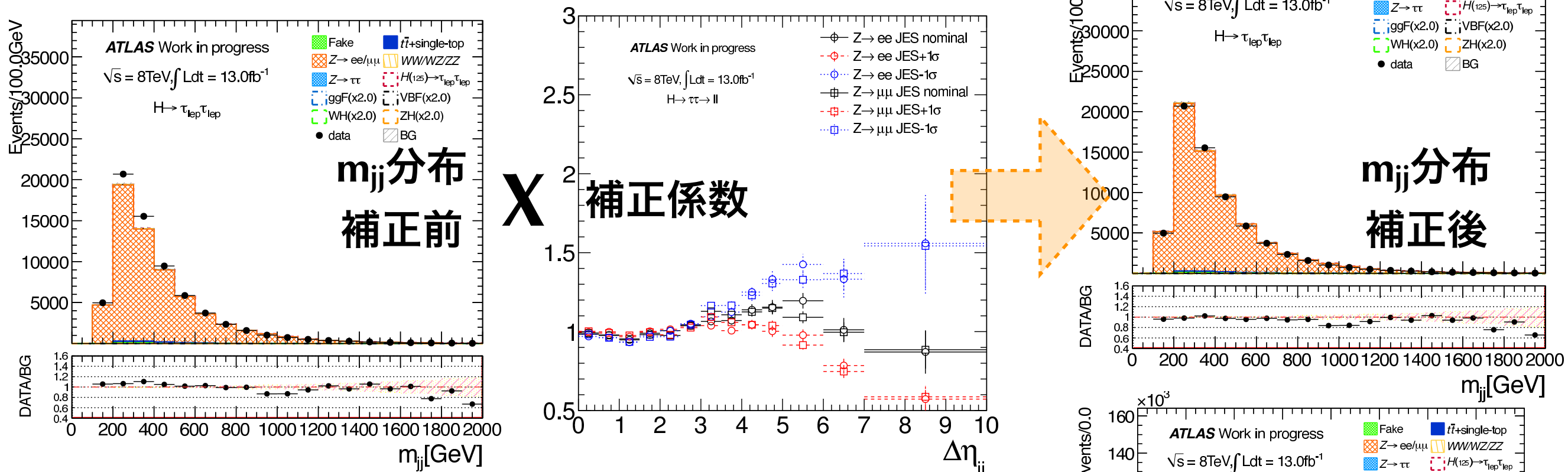


Category	Mismodeling factor
e^+e^- VBF	$0.89 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ VBF	$0.85 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$
e^+e^- Boosted	$0.89 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.10(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ Boosted	$0.88 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst})$
e^+e^- VH	$0.993 \pm 0.019(\text{stat}) \pm 0.22(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ VH	$0.963 \pm 0.014(\text{stat}) \pm 0.24(\text{syst})$
e^+e^- 1jet	$0.920 \pm 0.007(\text{stat}) \pm 0.20(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ 1jet	$0.913 \pm 0.006(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$

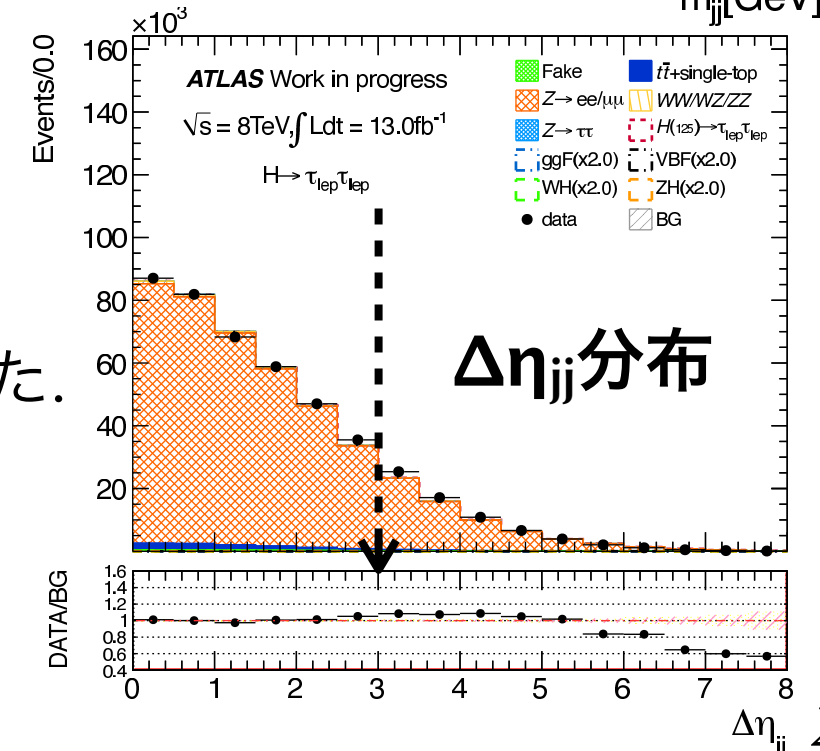


$Z \rightarrow ee/\mu\mu$ MCの補正($\Delta\eta_{jj}$)

- $\Delta\eta_{jj}$ の補正: MCはjetの間の角度を正しく再現していない→MCジェネレータのmis-model
- $\Delta\eta_{jj}$ が高い領域はVBF SRでの見積もる際に非常に重要.
- 観測データから他の背景事象の寄与を引いく

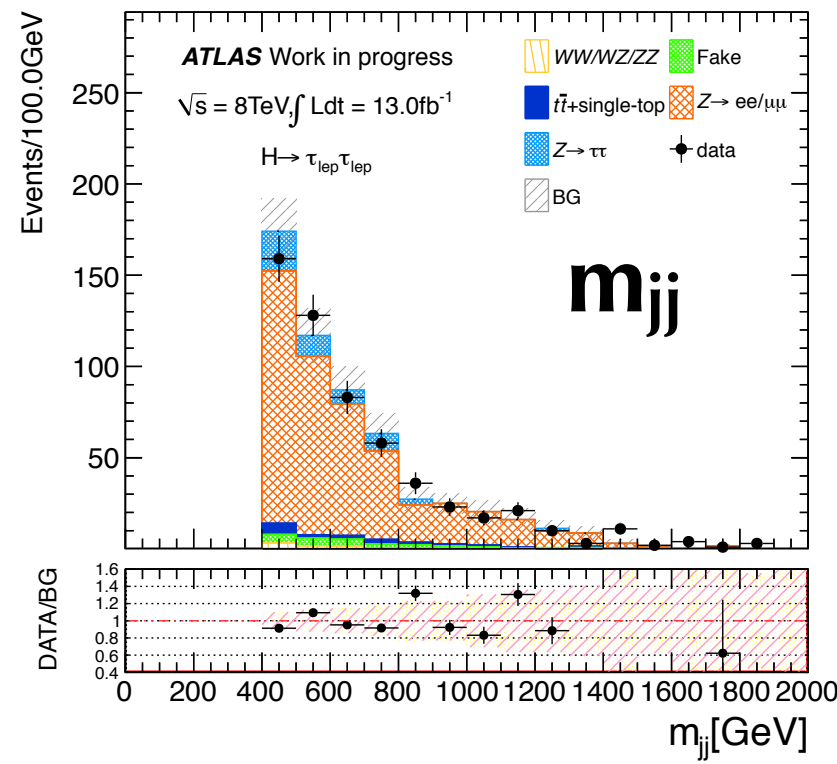
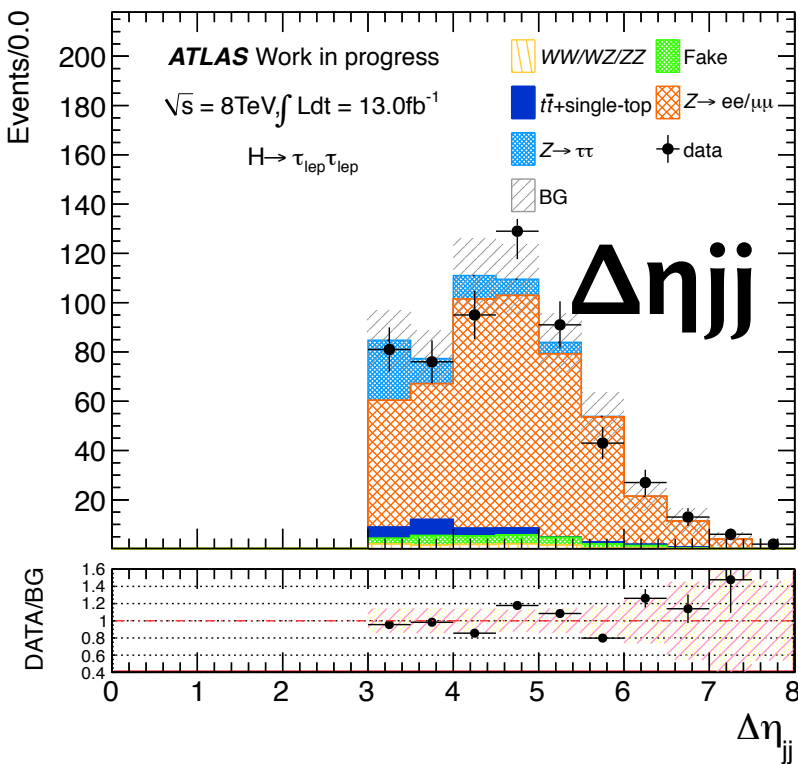


- 補正後は, m_{jj} 分布が良く一致していることがわかる.
- 系統誤差は, 補正係数を変化させて見積もりの差異を考慮した.

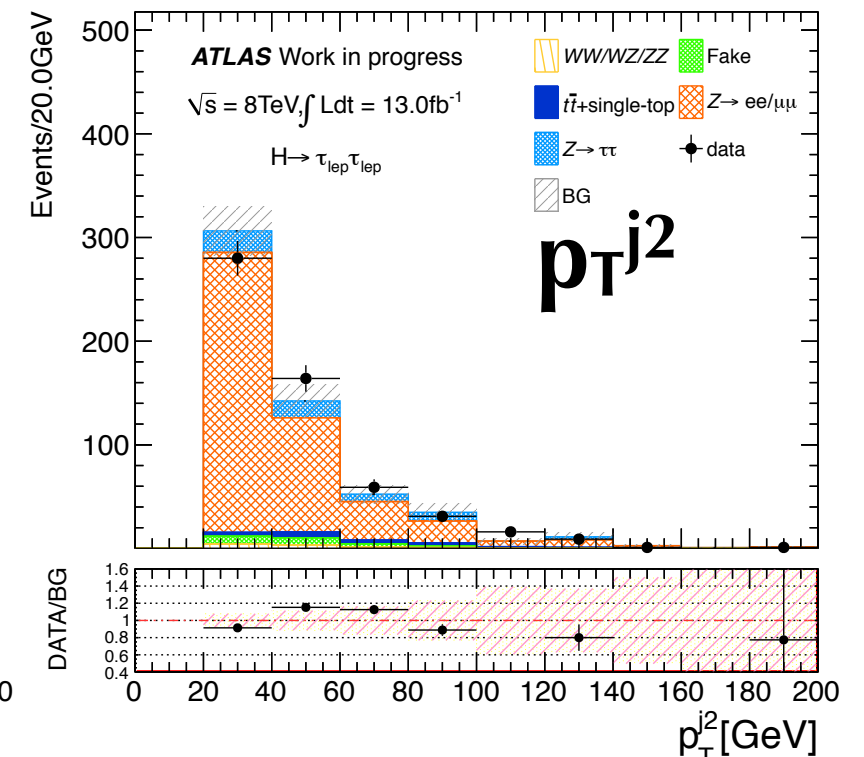
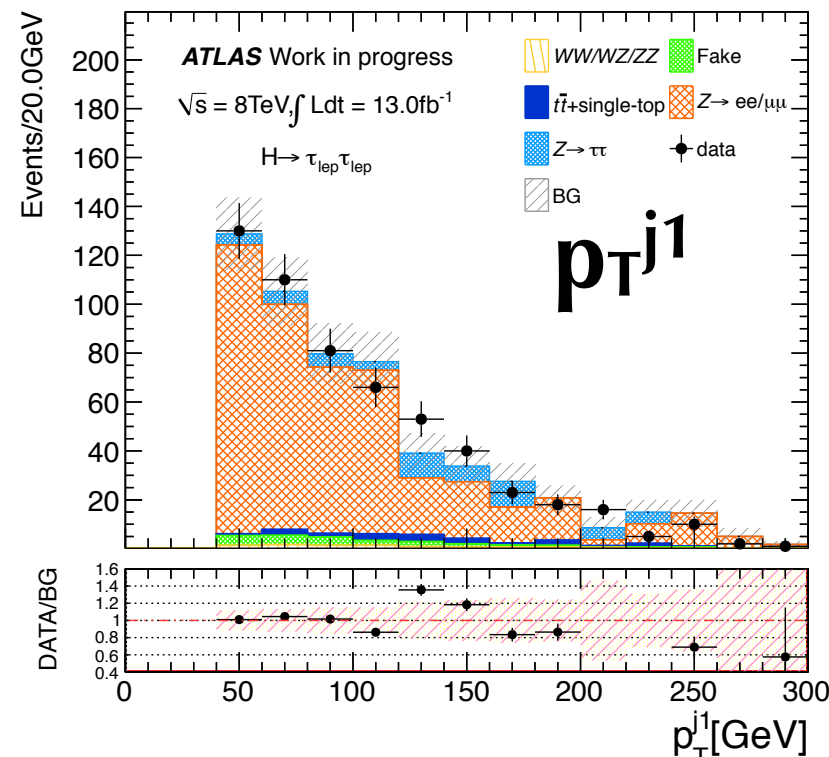
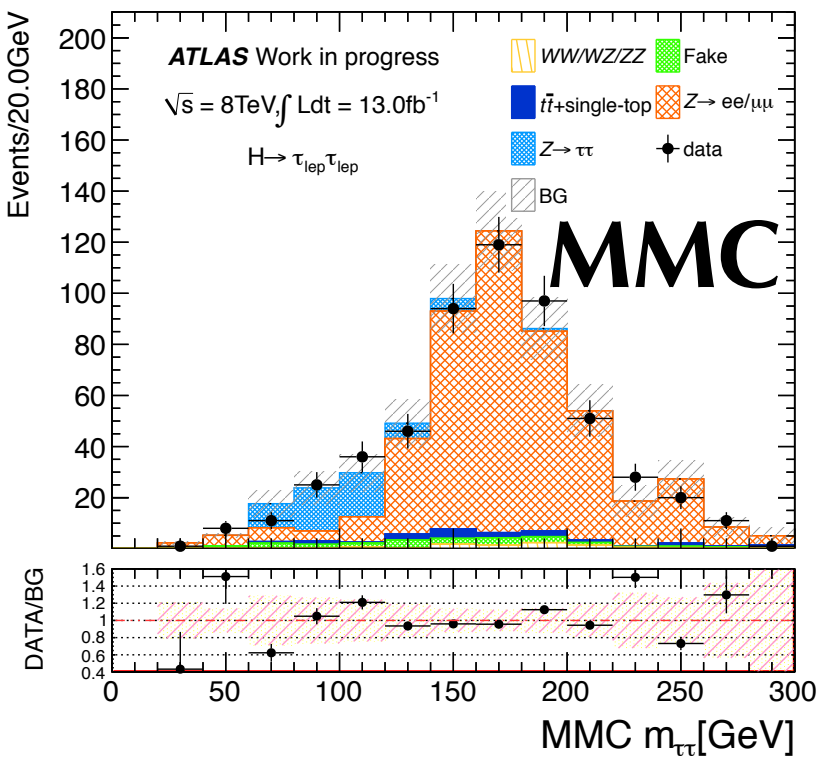


2jet VBF $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ CR

- $|m_{ee} - m_Z| < 15 \text{ GeV}$ で $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ CR をとって確認した

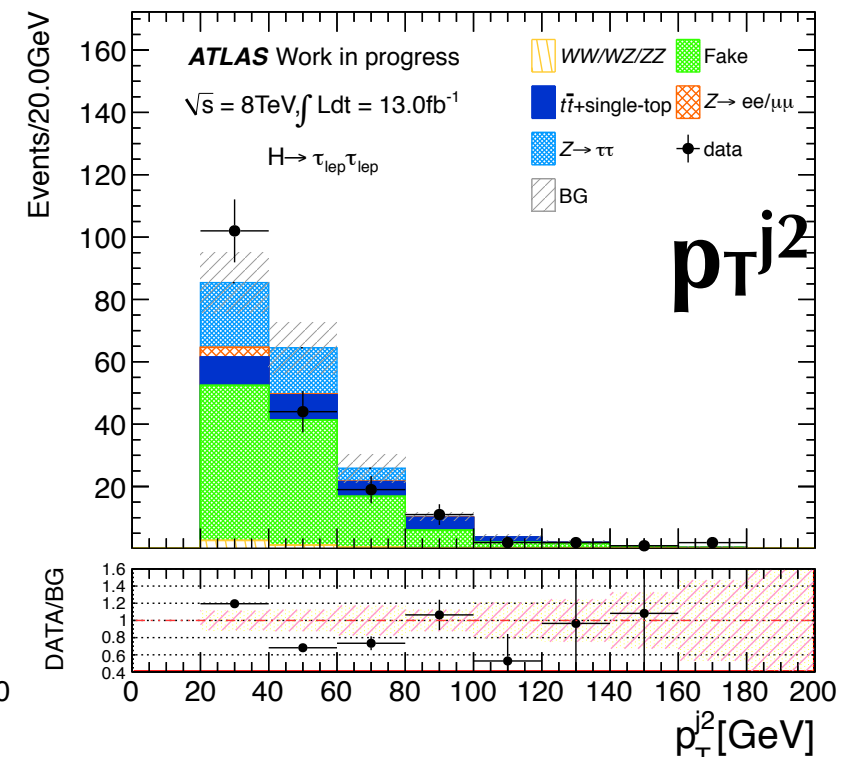
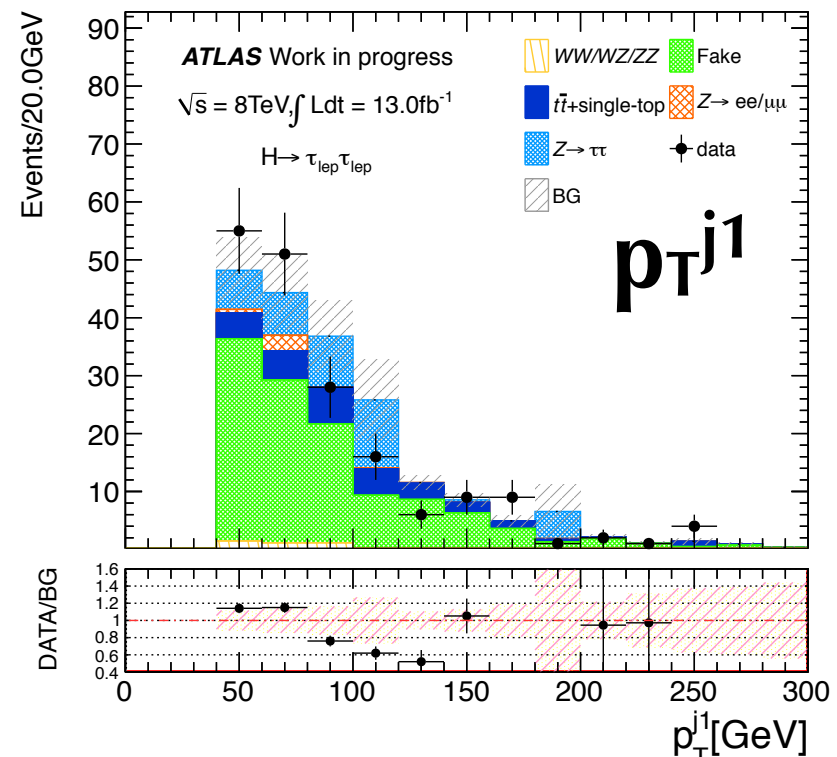
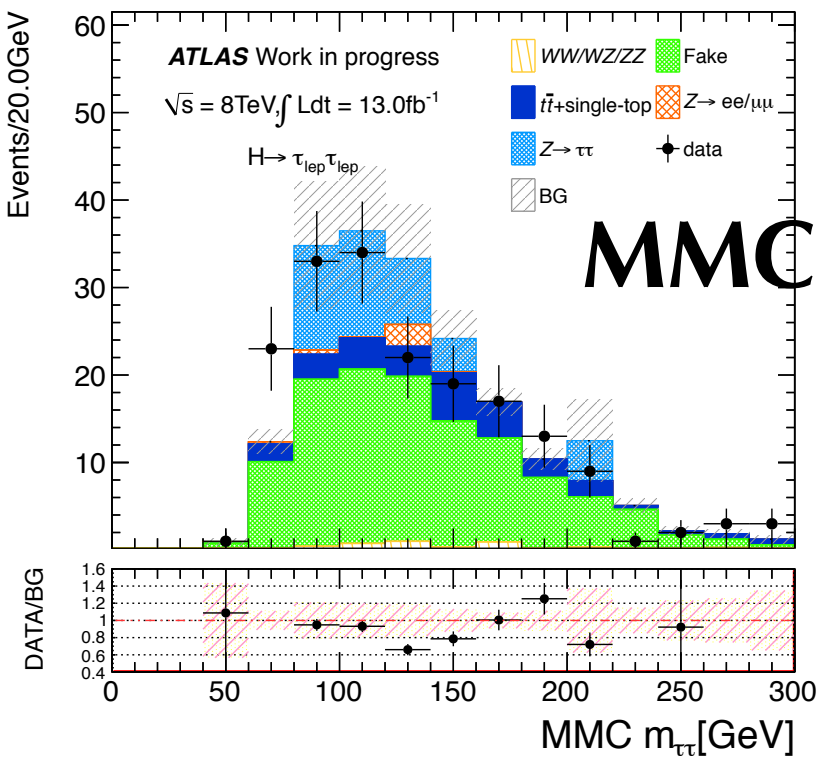
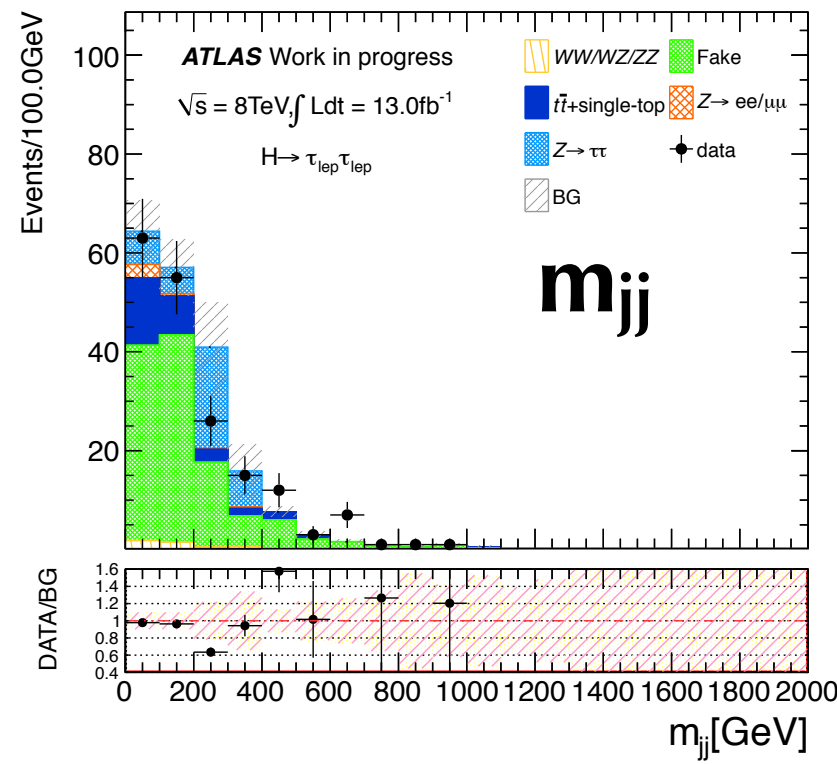
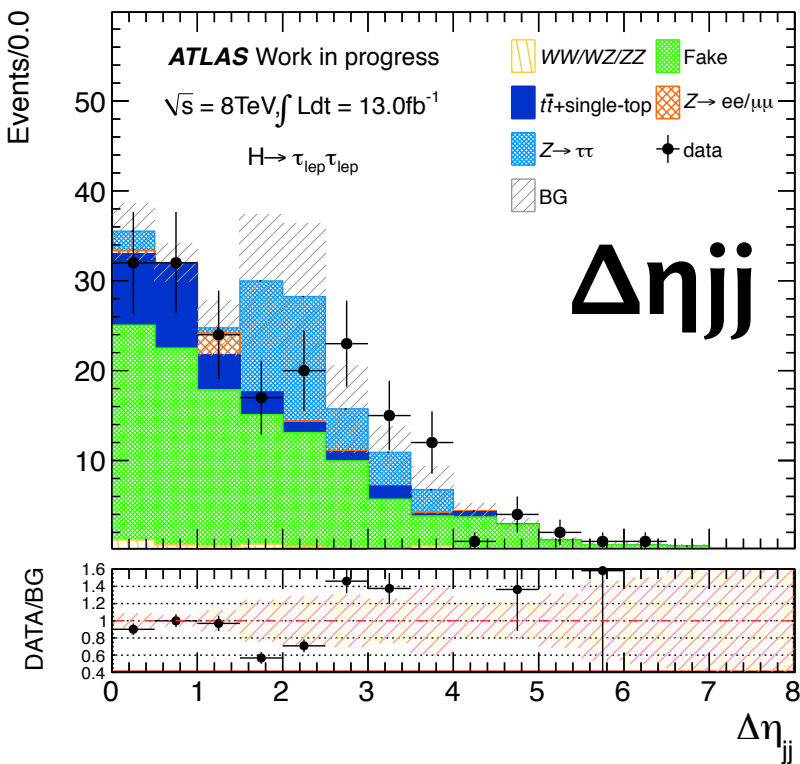


Category	Mismodeling factor
e^+e^- VBF	$0.89 \pm 0.02(stat) \pm 0.09(syst)$
$\mu^+\mu^-$ VBF	$0.85 \pm 0.02(stat) \pm 0.06(syst)$
e^+e^- Boosted	$0.89 \pm 0.03(stat) \pm 0.10(syst)$
$\mu^+\mu^-$ Boosted	$0.88 \pm 0.02(stat) \pm 0.08(syst)$
e^+e^- VH	$0.993 \pm 0.019(stat) \pm 0.22(syst)$
$\mu^+\mu^-$ VH	$0.963 \pm 0.014(stat) \pm 0.24(syst)$
e^+e^- 1jet	$0.920 \pm 0.007(stat) \pm 0.20(syst)$
$\mu^+\mu^-$ 1jet	$0.913 \pm 0.006(stat) \pm 0.18(syst)$



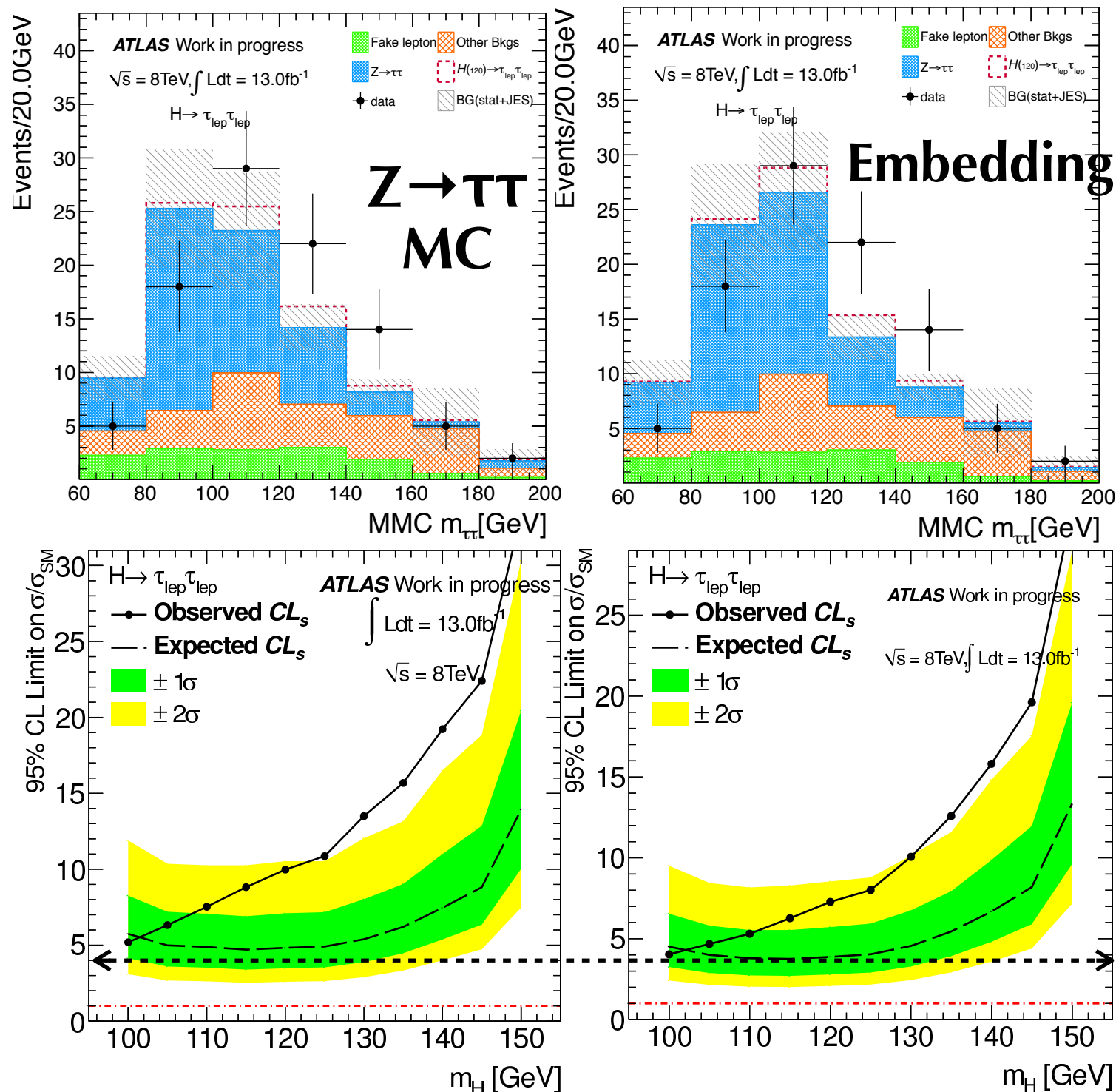
2jet Same Sign CR

- Same Sig事象において,カットを緩めて確認→事象数が非常に少ないため



2jet VBF $Z \rightarrow \tau\tau$ MC

- $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象の見積もりに関して, Embeddingサンプルではなく, MCを用いた場合
- 100GeVのビンに, 若干の違いが見られるが Excess に対してはほとんど変化がない。

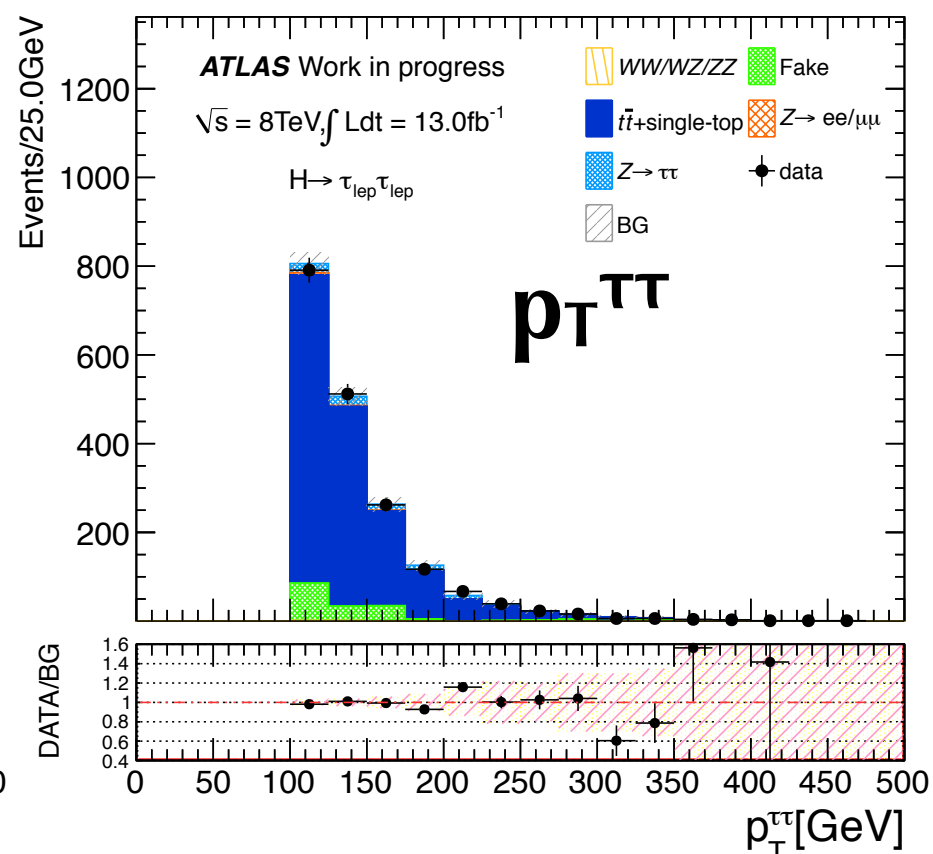
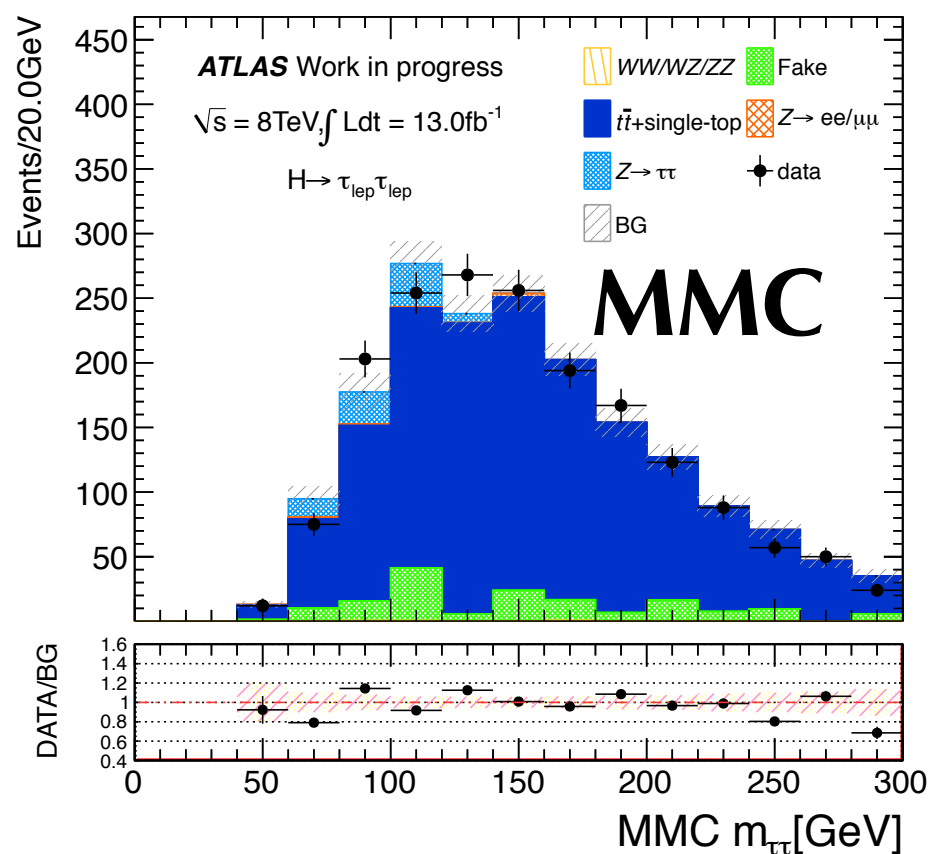


Boostedの確認

- Boosted SRのExcessについて,次のことを確認した
 - MMC mass以外の, $p_{T\tau\tau}$ について
 - Top事象
 - CRでの補正と分布の確認
 - Z+jets事象
 - CRでの分布の確認
 - Fake lepton事象
 - Same Sign事象を用いて分布を確認
 - $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象について,MCサンプルを用いた場合の見積り

Boosted Top CR

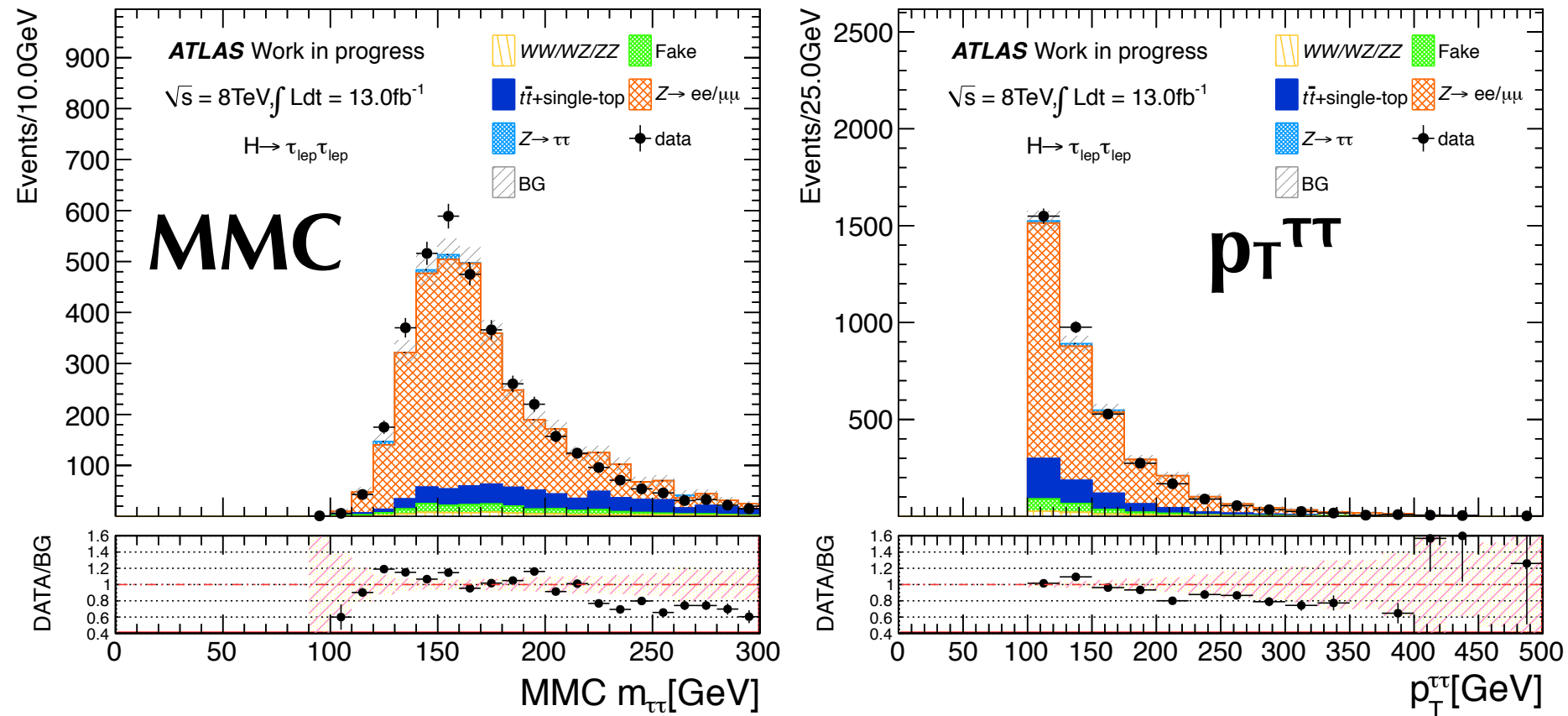
- b-tagged jetを要求することで2jet VBF Top CRを設定し分布を確認した



SR	factor $\pm$ (stat) $\pm$ (syst)
VBF	$0.87 \pm 0.01^{+0.18}_{-0.25}$
Boosted	$1.12 \pm 0.05^{+0.07}_{-0.05}$
VH	$1.05 \pm 0.04^{+0.13}_{-0.16}$
1jet	$1.12 \pm 0.03^{+0.16}_{-0.12}$

Boosted $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ CR

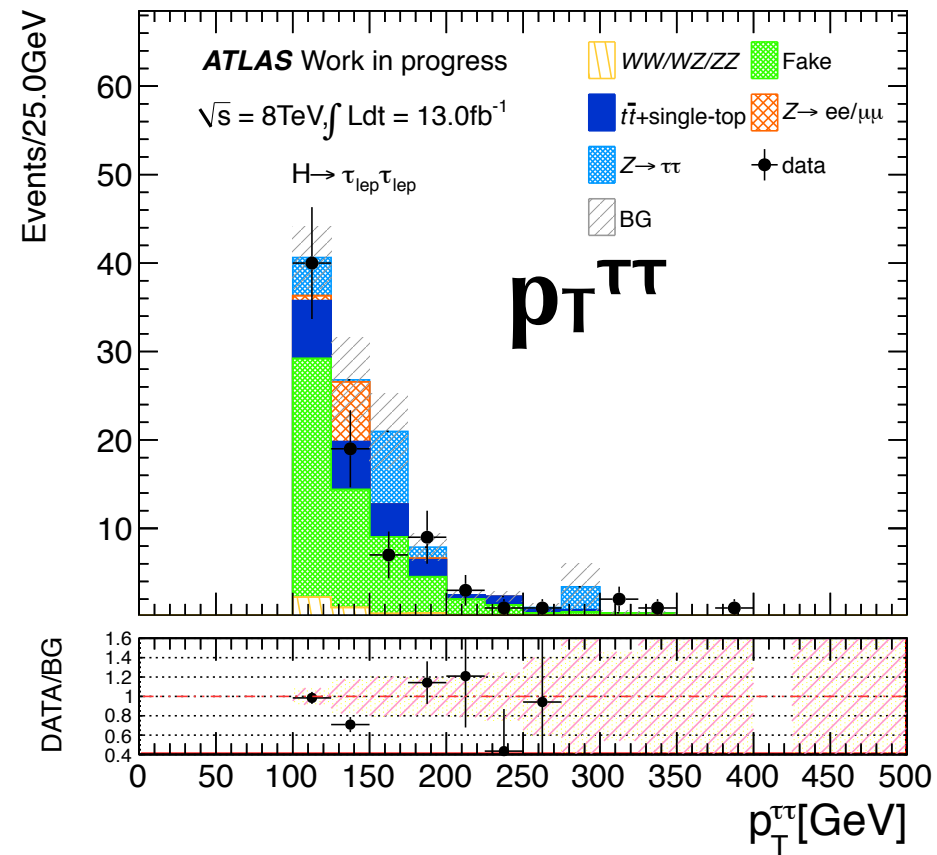
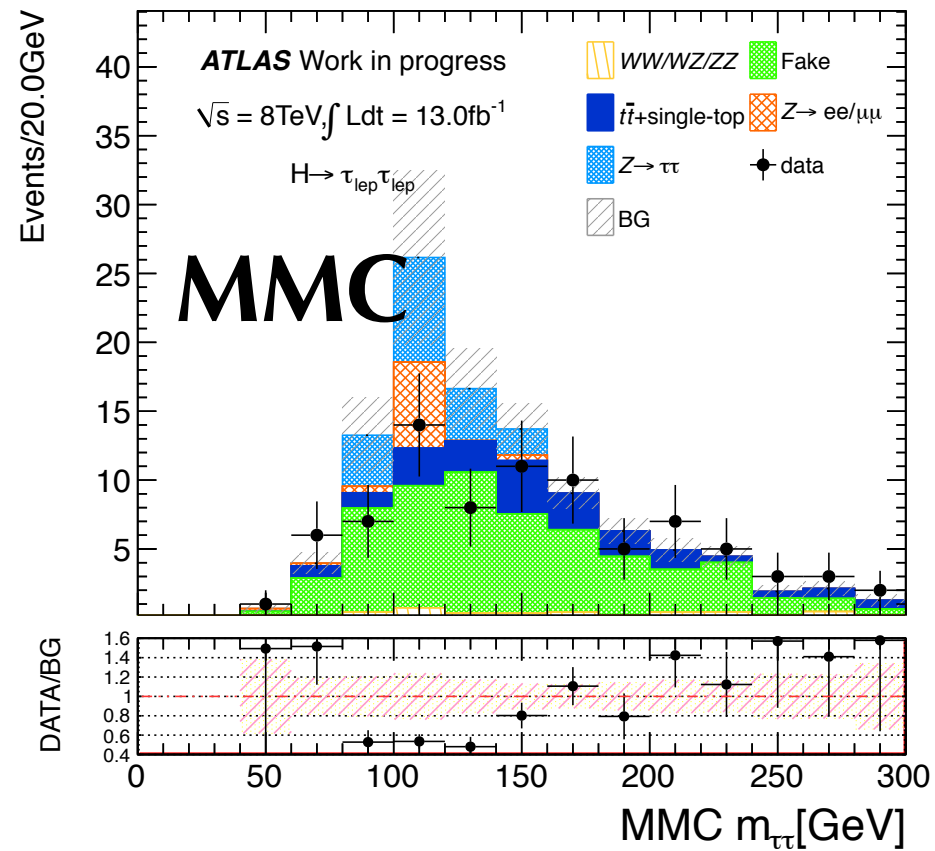
- $|m_{ee} - m_Z| < 15 \text{ GeV}$ で $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ CR をとって確認した



Category	Mismodeling factor
e^+e^- VBF	$0.89 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ VBF	$0.85 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$
e^+e^- Boosted	$0.89 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.10(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ Boosted	$0.88 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst})$
e^+e^- VH	$0.993 \pm 0.019(\text{stat}) \pm 0.22(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ VH	$0.963 \pm 0.014(\text{stat}) \pm 0.24(\text{syst})$
e^+e^- 1jet	$0.920 \pm 0.007(\text{stat}) \pm 0.20(\text{syst})$
$\mu^+\mu^-$ 1jet	$0.913 \pm 0.006(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$

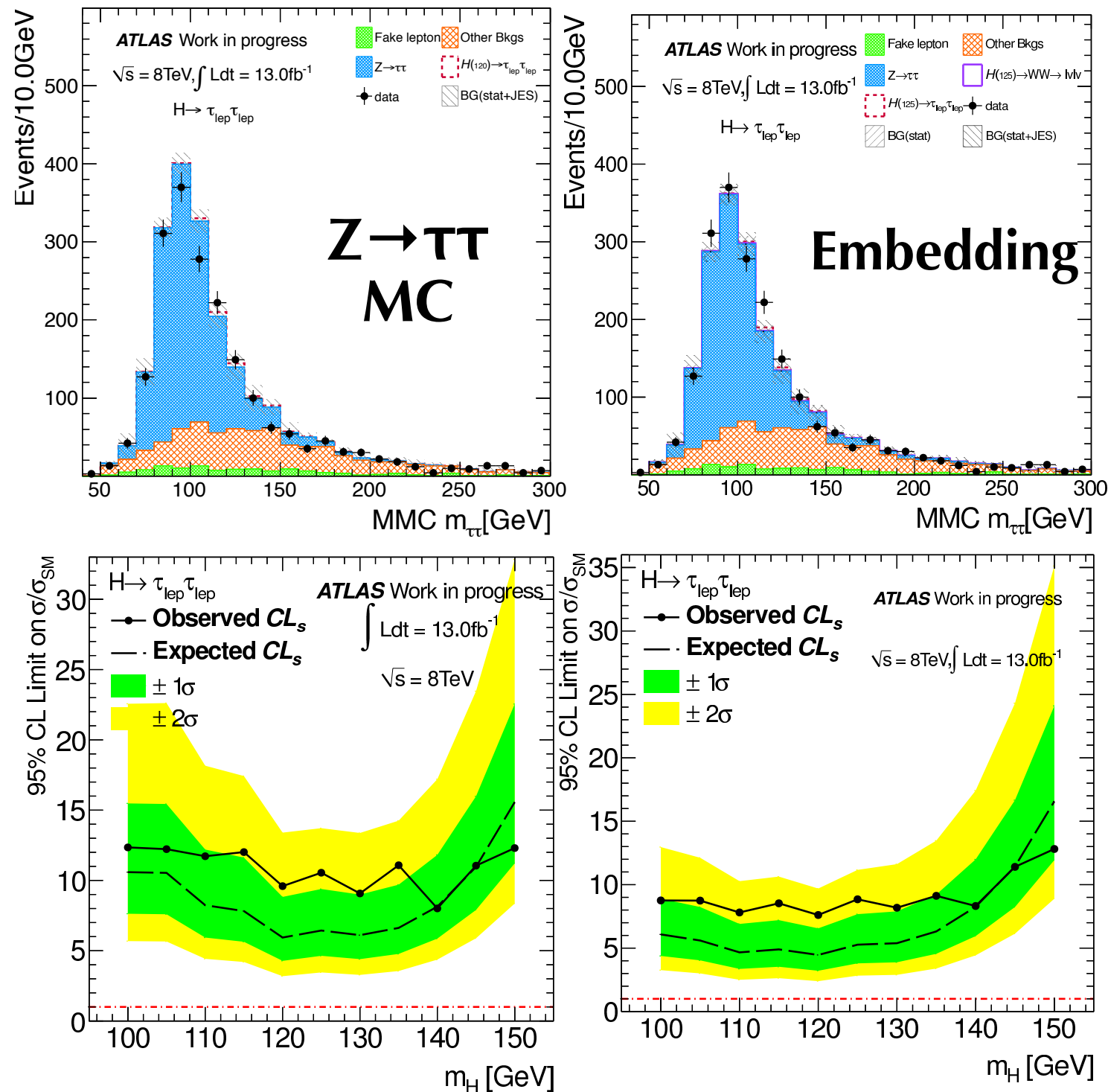
Same Sign CR

- Same Sign事象を用いて,条件を緩めてFake lepton事象を確認した.



Boosted $Z \rightarrow \tau\tau$ MC

- $Z \rightarrow \tau\tau$ 事象の見積もりに関して, Embeddingサンプルではなく, MCを用いた場合



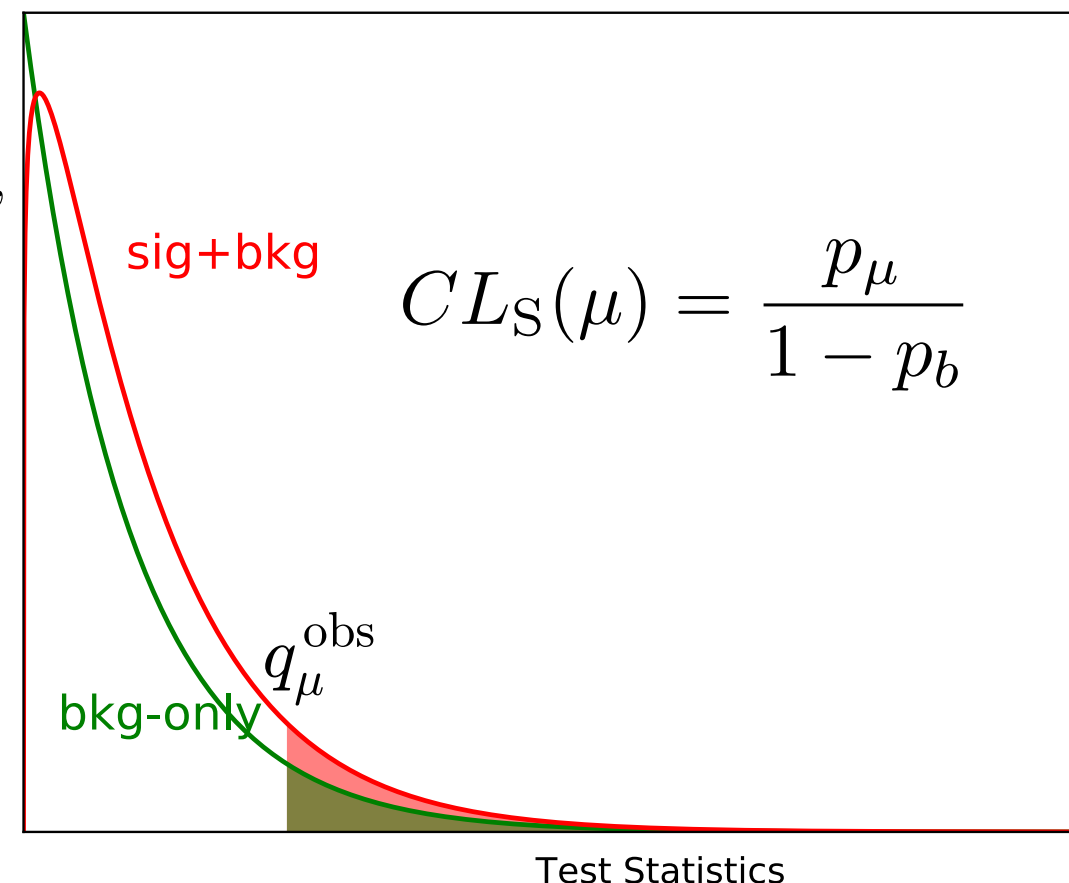
Limit calculation

- 標準模型Higgs粒子の生成断面積に対して制限を付ける.
- 本解析では, Profile Likelihoodを用いて観測された事象に対して見積もられた背景事象をフィットした.
- Likelihoodの定義 $\mathcal{L}(\mu, \theta) = \prod_j \prod_{i=\text{bin}} \text{Poisson} \left(N_i(j) | \mu (s_i^{\text{ggF}}(j) + s_i^{\text{VBF}}(j) + s_i^{\text{WH}}(j) + s_i^{\text{ZH}}(j)) + b_i(j) \right) \prod_{\theta} \text{Gaussian}(t | \theta, 1)$
- 検定量とp-value
- Confidence Levelは背景事象のみのp-valueと信号事象を考慮した場合のp-valueの比として CL_s で定義する

$$\tilde{q}_{\mu} = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\text{data} | \mu, \hat{\theta}_{\mu})}{\mathcal{L}(\text{data} | \hat{\mu}, \hat{\theta})} \text{ with a constraint } 0 \leq \hat{\mu} \leq \mu$$

$$p_{\mu} = P(\tilde{q}_{\mu} \geq \tilde{q}_{\mu}^{\text{obs}} | \text{signal+background}) = \int_{\tilde{q}_{\mu}^{\text{obs}}}^{\infty} f(\tilde{q}_{\mu} | \mu, \hat{\theta}_{\mu}^{\text{obs}}) d\tilde{q}_{\mu},$$

$$1 - p_b = P(\tilde{q}_{\mu} \geq \tilde{q}_{\mu}^{\text{obs}} | \text{background-only}) = \int_{\tilde{q}_{\mu}^{\text{obs}}}^{\infty} f(\tilde{q}_{\mu} | 0, \hat{\theta}_0^{\text{obs}}) d\tilde{q}_{\mu},$$



ATLAS detector

- LHC: 4TeV+4TeVの陽子陽子衝突型加速器
- ATLAS: 衝突型汎用型検出器であり, Higgs粒子, 超対称性粒子探索を行う能力を有する

Muonの再構成

- Inner Tracker
- Muon Spectrometer

Electronの再構成

- Inner Tracker
- EM Calorimeter

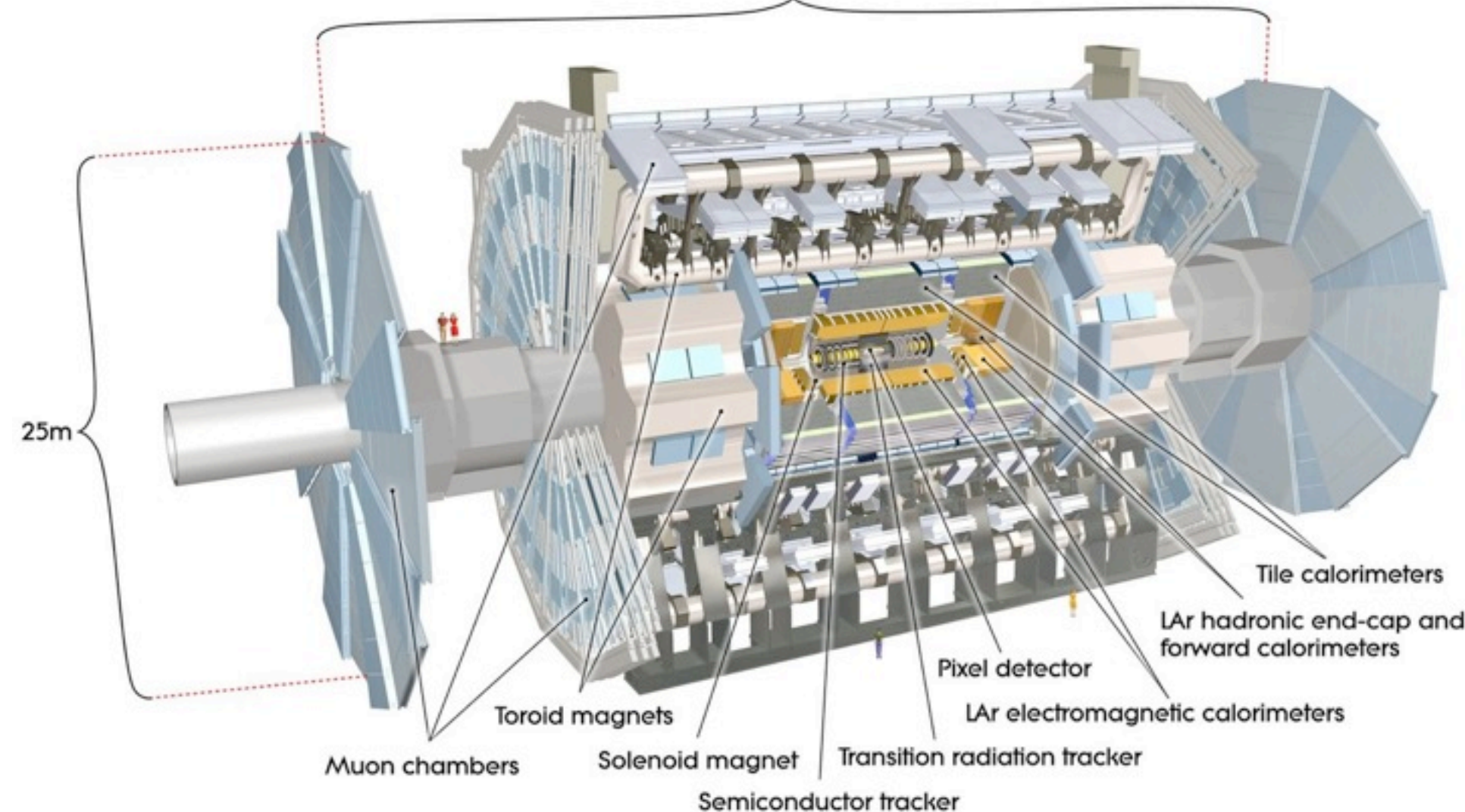
44m

Jetの再構成

- Hadron Calorimeter
- EM Calorimeter

E_T^{miss} の再構成

- 全ObjectのpTベクトル和に負号を付ける



背景事象

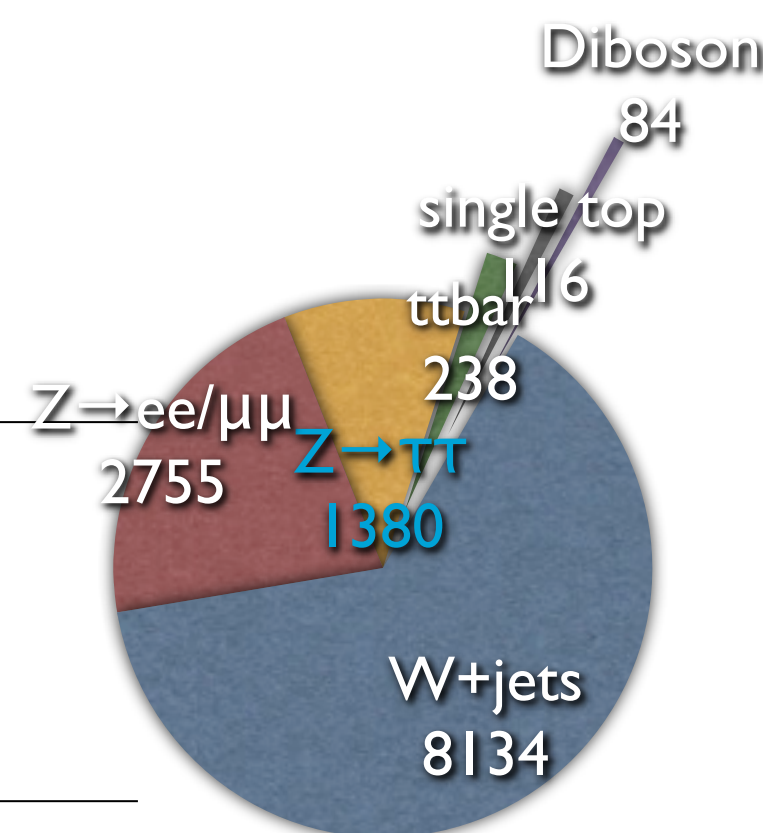
- 背景事象には, lepton, E_T^{miss} , jetが伴うプロセス
- MCサンプルを観測データを用いて補正する

	$\sigma \times \text{Br} [\text{pb}]$	MCサンプル	Estimation
$Z \rightarrow \tau\tau$	1.83×10^3	ALPGEN	$Z \rightarrow \mu\mu$ embedding methodを用いる→後述
$Z \rightarrow ee/\mu\mu$	4.60×10^3	ALPGEN	E_T^{miss} , jet kinematicsをデータで補正→後述
W+jets	12.2×10^3	-	Fake lepton事象をデータを用いて見積もる→後述
QCD	1×10^9	-	
ttbar	238	MC@NLO	MCを b -tagged CRデータを用いて補正
single-top	52.6	MC@NLO	
Diboson	13.7	Herwig, MC@NLO..	MCサンプルのみで評価する
$H \rightarrow WW$ (dilepton)	0.26	PowHeg	本解析チャンネルの約3倍の断面積, 終状態が同じ なため背景事象となる→ $m_H=125\text{GeV}$, 生成断面積 は標準模型と同じで背景事象とした

背景事象

- 本解析で背景事象となる標準模型のプロセスは,主に5つある.

$W(\rightarrow \ell\nu)+\text{jets}$	12.2×10^3
$Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell+\text{jets}(m_{\ell\ell} > 10 \text{ GeV})$	5.51×10^3
$t\bar{t}$	238
Single top-quark t, s and Wt -channels	87.8, 5.6, 22.4
WW, WZ and $ZZ(M_{Z/\gamma^*} > 20 \text{ GeV})$	53.9, 22.3, 7.3



- **Z → ττ+jets**:断面積も大きく終状態が同じ.最も大きな背景事象.取り除くことは困難,系統誤差を小さくする→観測データを用いてこれを見積もる.
- **Z → ee/μμ+jets**: 大きな断面積,MCをデータを用いて補正する.
- **W+jets,QCD**:QCDは断面積に大きな不定性,MCでの見積もりは困難→観測データを用いてこれを見積もる.
- Top:MCを観測データで補正した.
- Diboson: MCを用いて見積もった.
- **H → WW → lvlv**: di-lepton崩壊過程で最も大きな生成断面積.Signal Topologyが似ているためSRへのコンタミが若干存在する→本解析では $m_H=125 \text{ GeV}$,信号強度を1.0として背景事象とした.

事象再構成

- 観測された事象から本解析で興味のある事象を選別する
- GRL(Good Runs Lists): ATLASの各測定器が正しく測定を行うことの出来た事象を選択
- Trigger: 信号事象の終状態はdi-lepton
 - di-lepton triggerを使用,single lepton triggerも合わせてORで使用

flavor	trigger
ee	di-electron ($p_T > 12 \text{ GeV}$) OR single electron ($p_T > 24 \text{ GeV}$)
e μ	el-mu combine ($p_T > 12, 8 \text{ GeV}$) OR single electron ($p_T > 24 \text{ GeV}$)
$\mu\mu$	di-muon ($p_T > 18, 8 \text{ GeV}$)

- 物理オブジェクトとして,Electron,Muon,Jetを再構成し,それぞれの物理オブジェクト間のオーバーラップを解く.
- E_T^{miss} を再構成する.
- 終状態に,2つのlepton(e/ μ)と E_T^{miss} がいることを要求する→Flavorは,ee/e μ / μ e/ $\mu\mu$ の4つ

事象選択

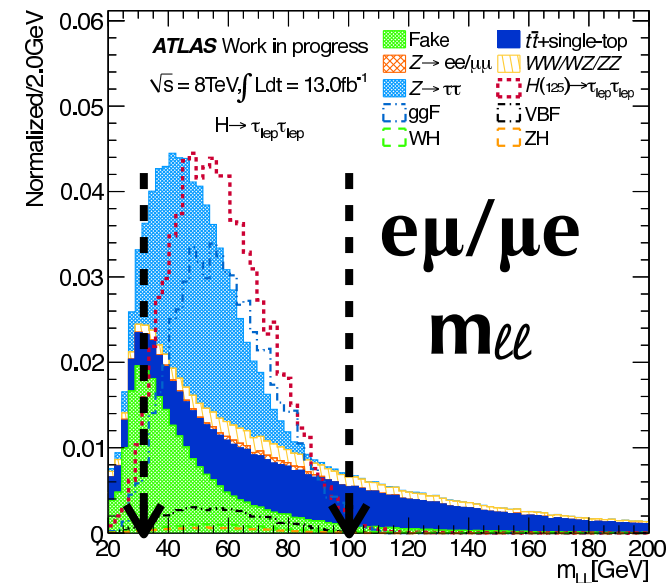
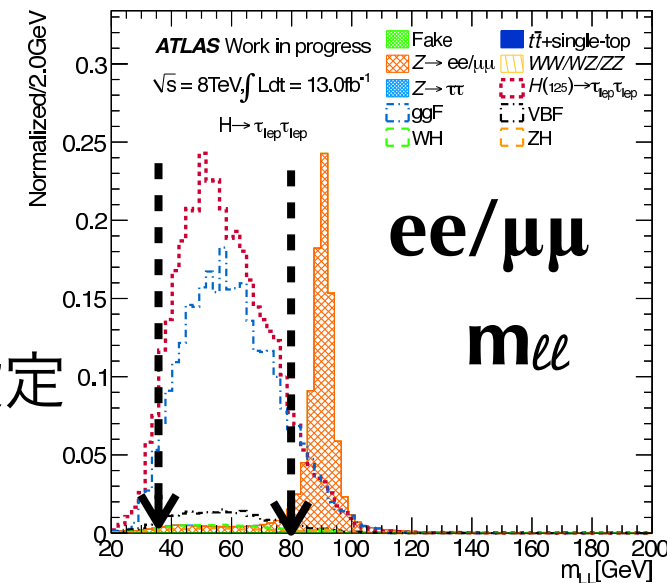
- 本解析の事象選択は7つのSignal Topologyの選別と, 4つのSRのカテゴリゼーションを行う.
- Triggerはdilepton, single lepton triggerの両方を用いた.
- 事象選択において重要なことは,
 - 断面積の大きい $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ や大きな系統誤差を持つFake leptonの排除
 - Signal Topologyの選択

Cut	$ee + \mu\mu$	$e\mu + \mu e$
Cut1	Pre-selection: exactly two leptons with opposite signs	
Cut2	$30 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 75 \text{ GeV}$	$30 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 100 \text{ GeV}$
Cut3	$p_T^{\ell 1} + p_T^{\ell 2} > 35 \text{ GeV}$	
Cut4	$p_T^{j1} > 40 \text{ GeV}$	
Cut5	$E_T^{\text{miss}} > 40(20) \text{ GeV}$	$E_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$
Cut6	$0.1 < x_{1,2} < 1.0$	
Cut7	$0.5 < \Delta\phi_{\ell\ell} < 2.5$	

Event Selection

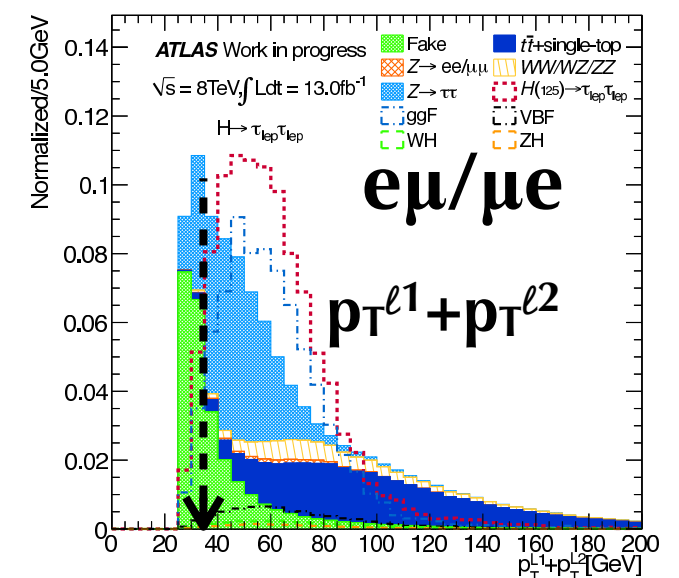
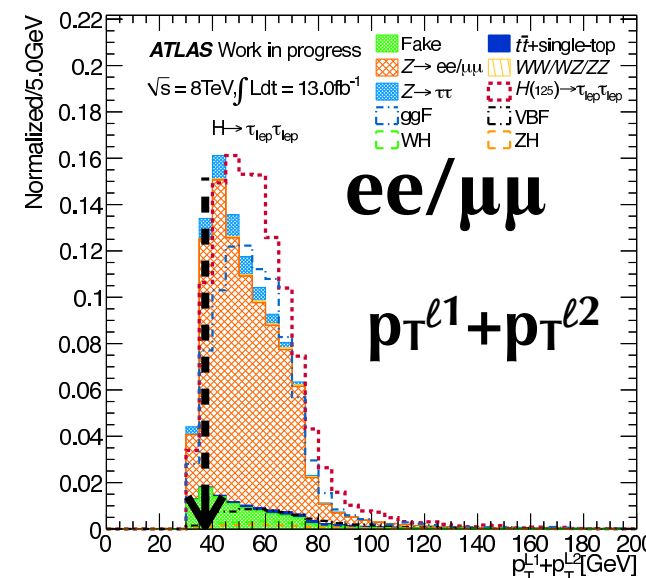
● Cut2 $m_{\ell\ell}$ カット:

- Flavor毎に別のカットを行う
- DF($ee, \mu\mu$): $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ が支配的
- SF($e\mu, \mu e$): 信号事象に対して選択的に設定



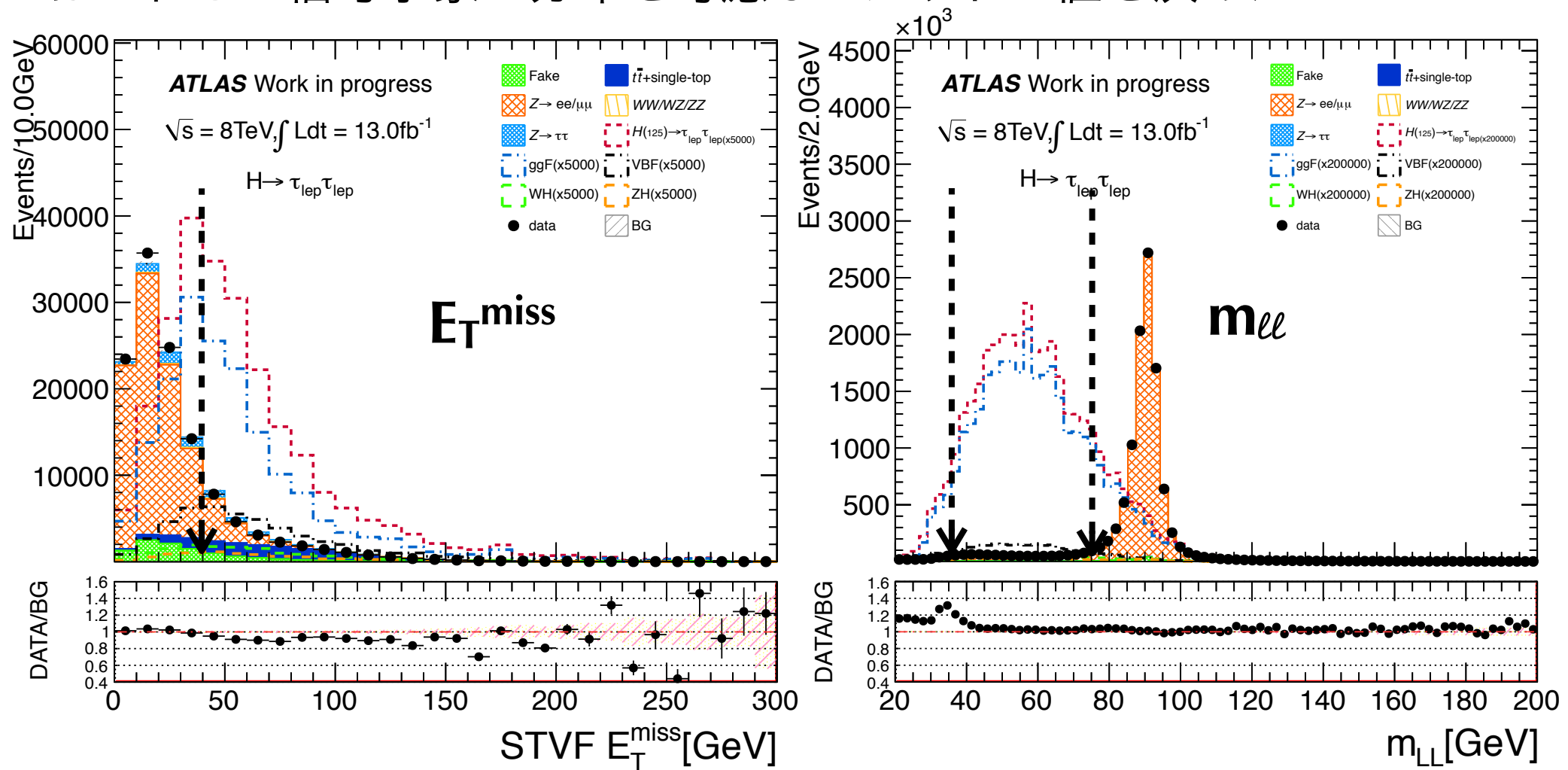
● Cut3 $p_T^{\ell 1} + p_T^{\ell 2} > 35\text{GeV}$ カット:

- Fake leptonはSignal leptonに比べて, p_T が低い
- 2つのleptonの p_T の合計でカット
- 特にDFでFake leptonを排除出来る



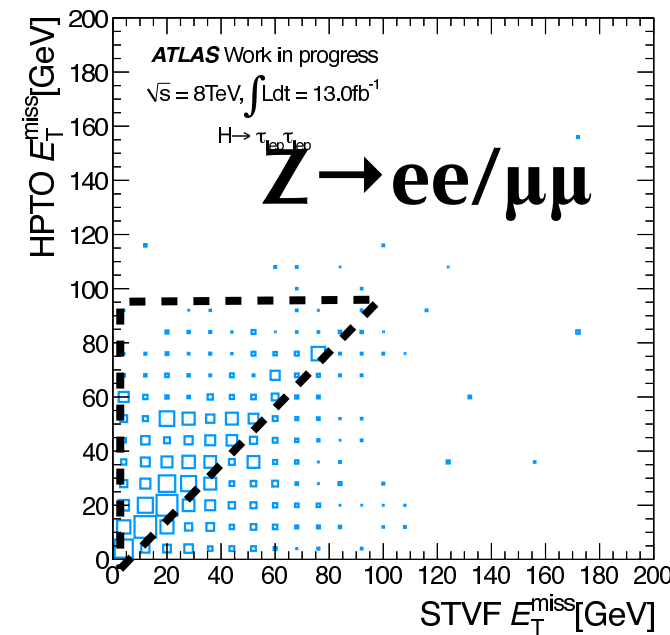
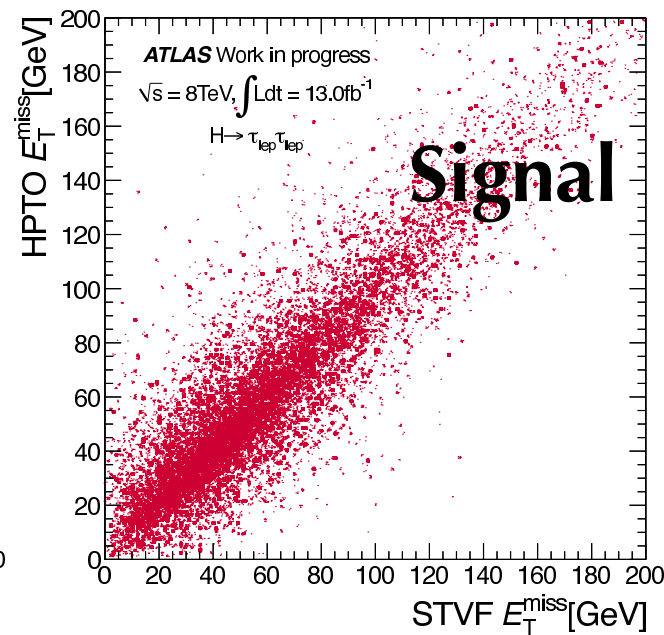
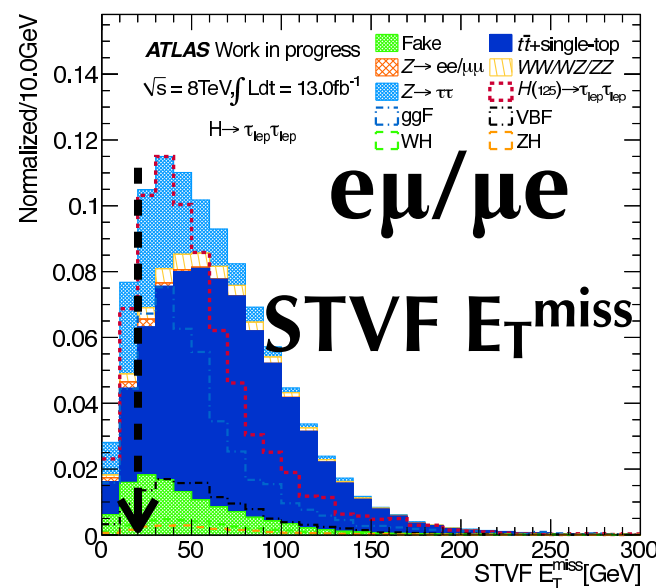
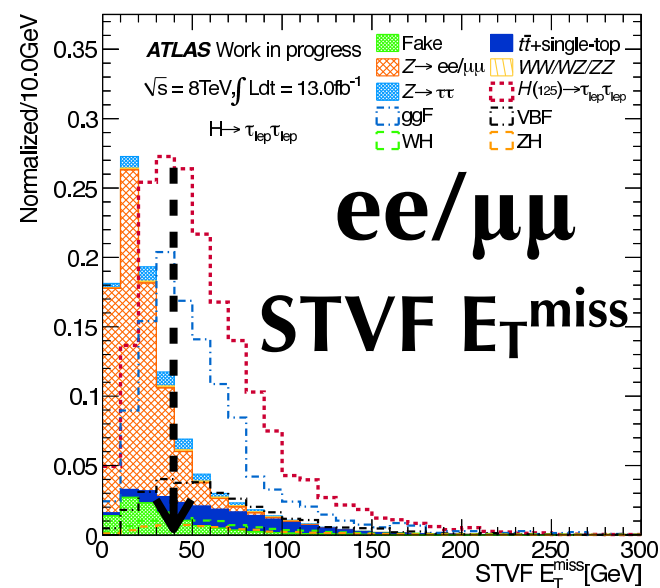
$Z \rightarrow ee/\mu\mu$ 事象の排除

- $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ プロセスは断面積が非常に大きく, $ee/\mu\mu$ flavor における支配的な背景事象となり得る.
- $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ は $m_{ll} = 91 \text{ GeV}$, ニュートリノがないため E_T^{miss} が生じない.
- 本解析ではこれらと信号事象の分布を考慮してカットの値を決めた.



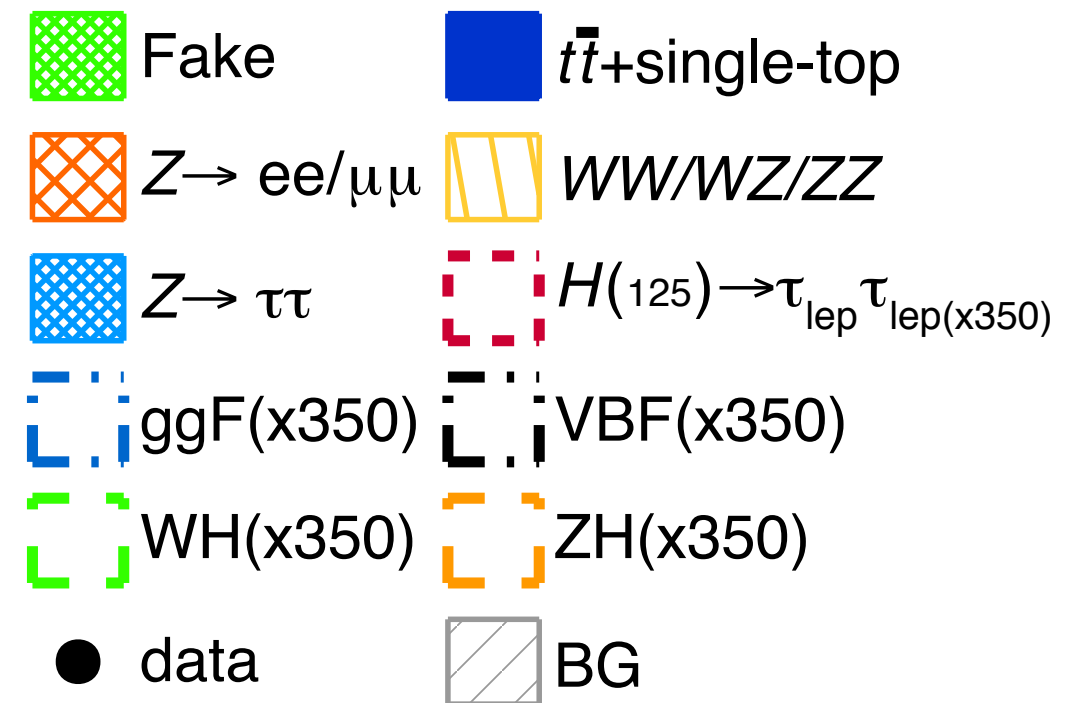
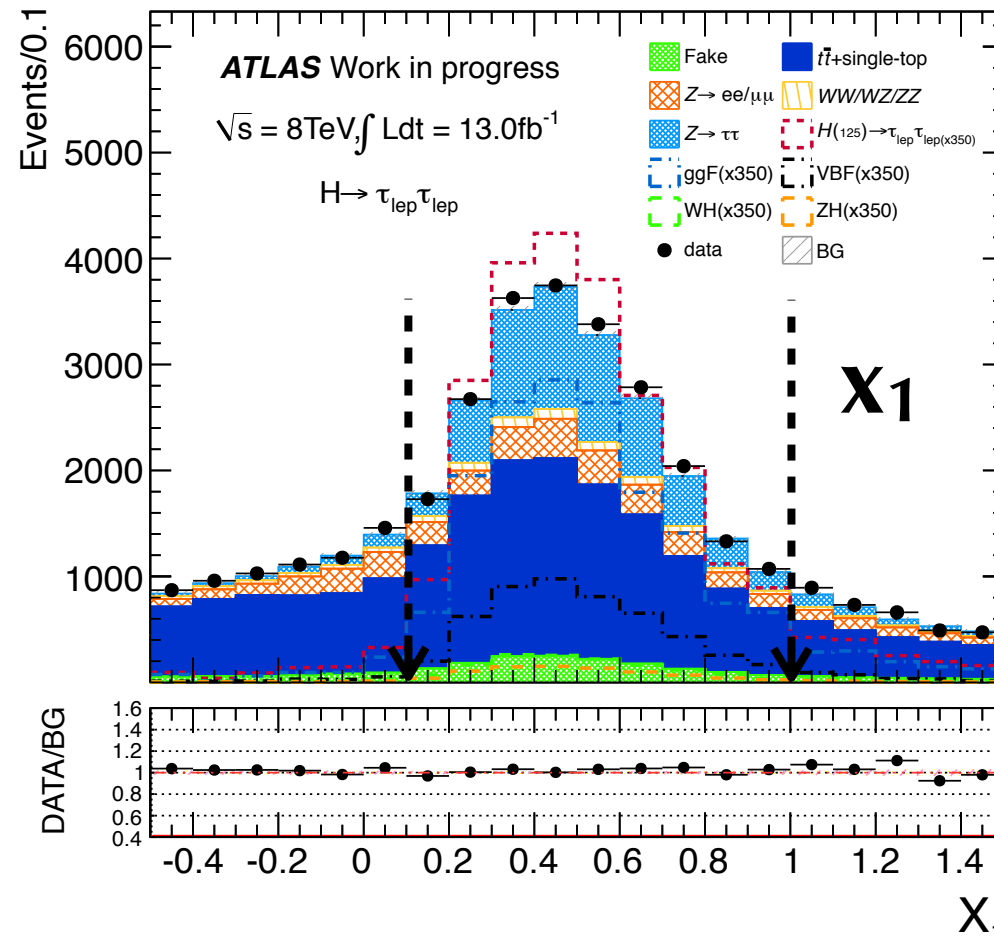
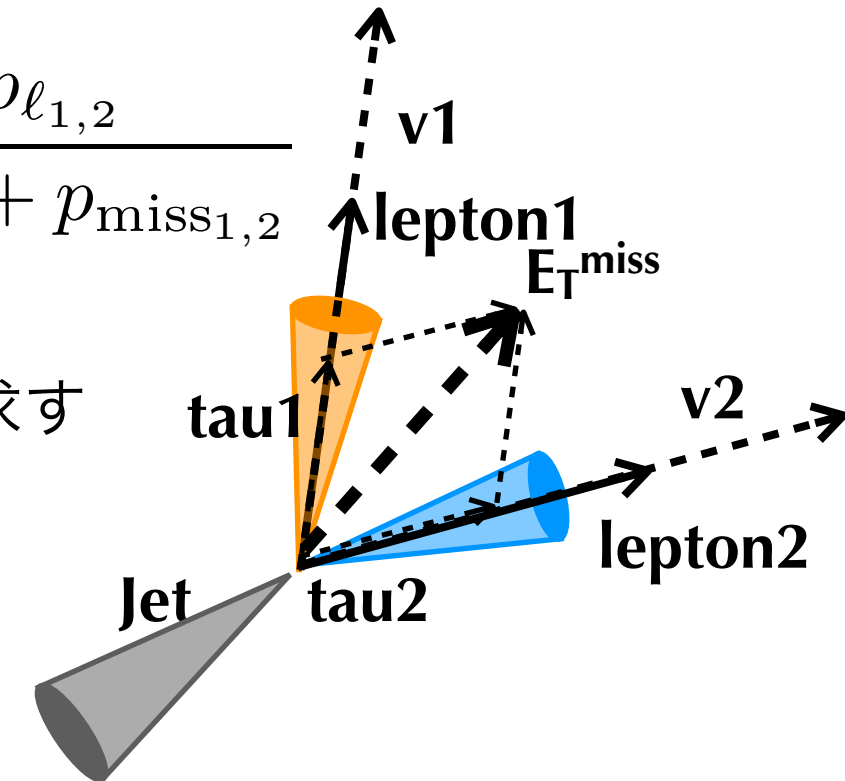
E_T^{miss} Cut

- **Cut5 $E_T^{\text{miss}} > 40(20)\text{GeV}$ for SF(DF):**
- Flavor毎に異なるカットを行う
 - DF: STVF $E_T^{\text{miss}} > 20\text{GeV}$ → 最低限のカット, SF: STVF, HPTO $E_T^{\text{miss}} > 40\text{GeV}$
- STVF(Soft Term Vertex Fraction):デフォルトの E_T^{miss} .
- HPTO(High pT Object):タグした2leptonとjet($p_T > 25\text{GeV}$)で構成した E_T^{miss}



Signal Topologyの選択

- $x_{1,2}$ を元の τ 粒子とleptonの運動量の比と定義 $x_{1,2} = \frac{p_{\ell_{1,2}}}{p_{\ell_{1,2}} + p_{\text{miss}_{1,2}}}$
- ニュートリノは τ 粒子からのみ $\rightarrow x_{1,2}$ について, $0.1 < x_{1,2} < 1.0$
- Signal Topologyを効率よく選択するために1つ以上のjetを要求する.
- $Z \rightarrow \tau\tau$ 以外の背景事象は半分程度このカットで排除できる.



Collinear Cut

- **Cut4 leading jet $p_T > 40 \text{ GeV}$:**

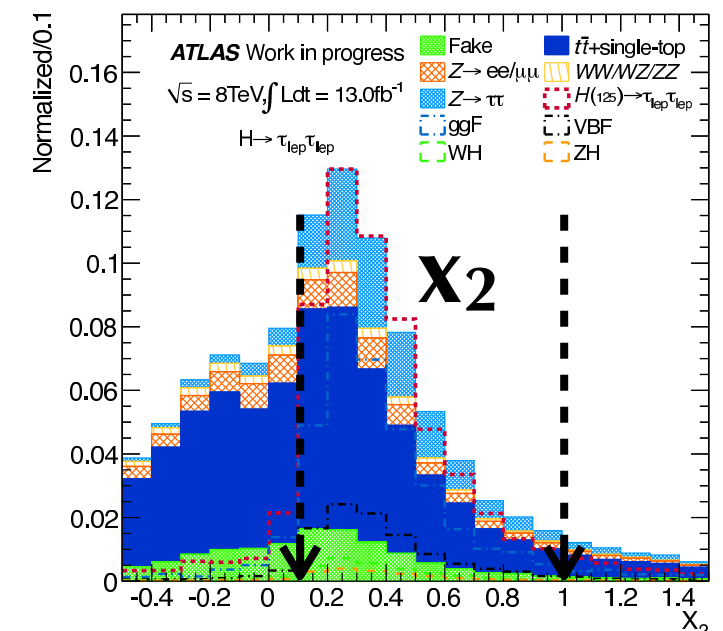
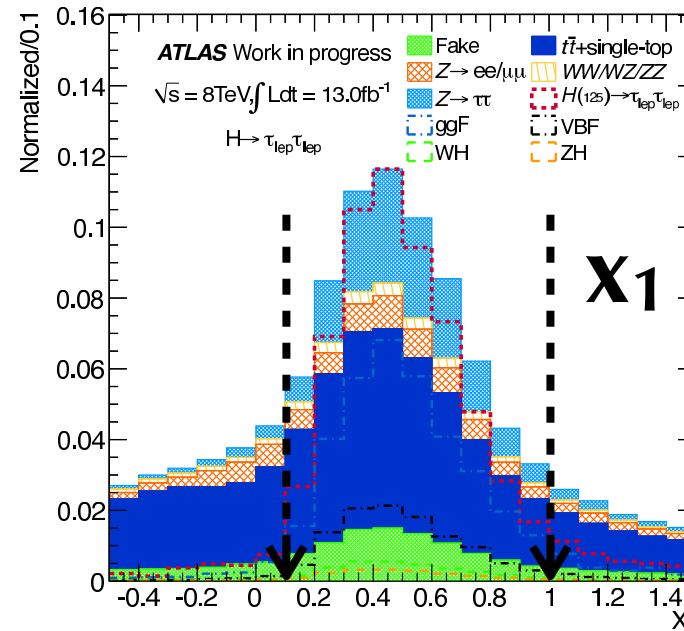
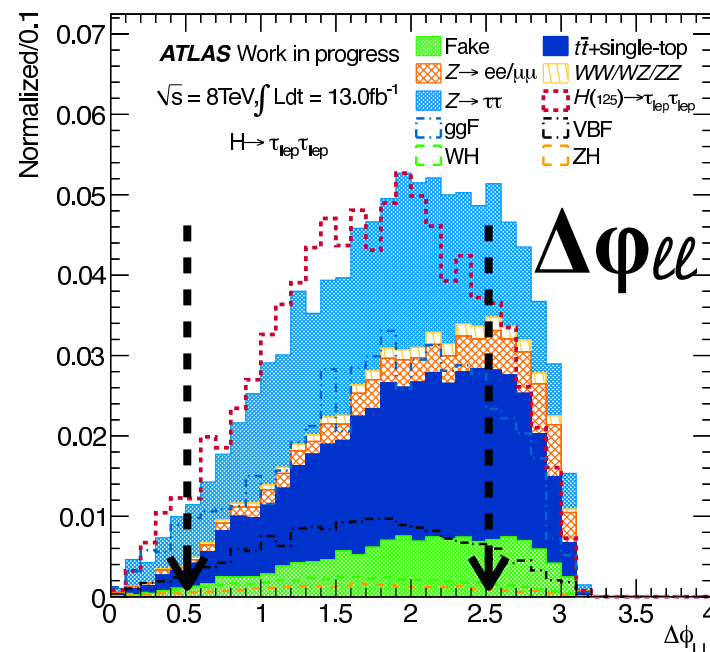
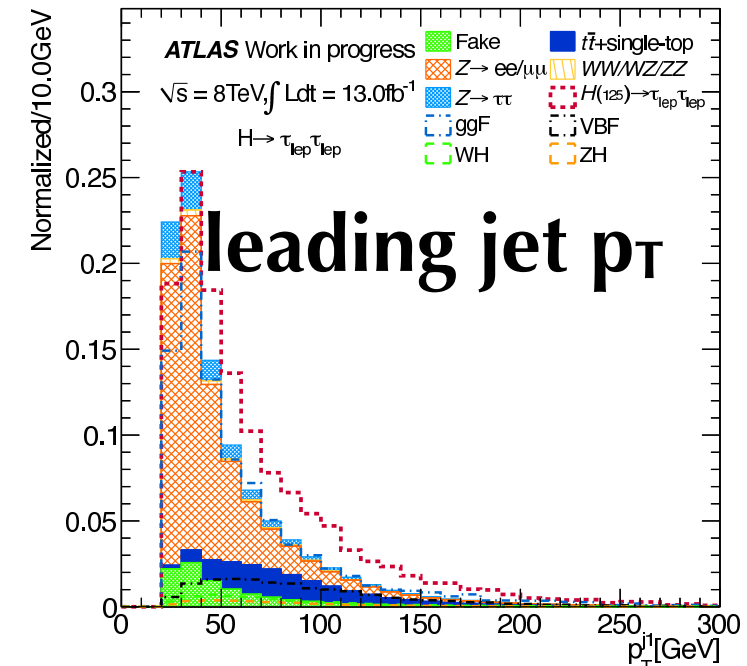
- Collinear近似を行うためにhigh p_T jetを要求

- **Cut6 $0.1 < x_{1,2} < 1.0$:**

- E_T^{miss} が2つのleptonの間にあること要求する

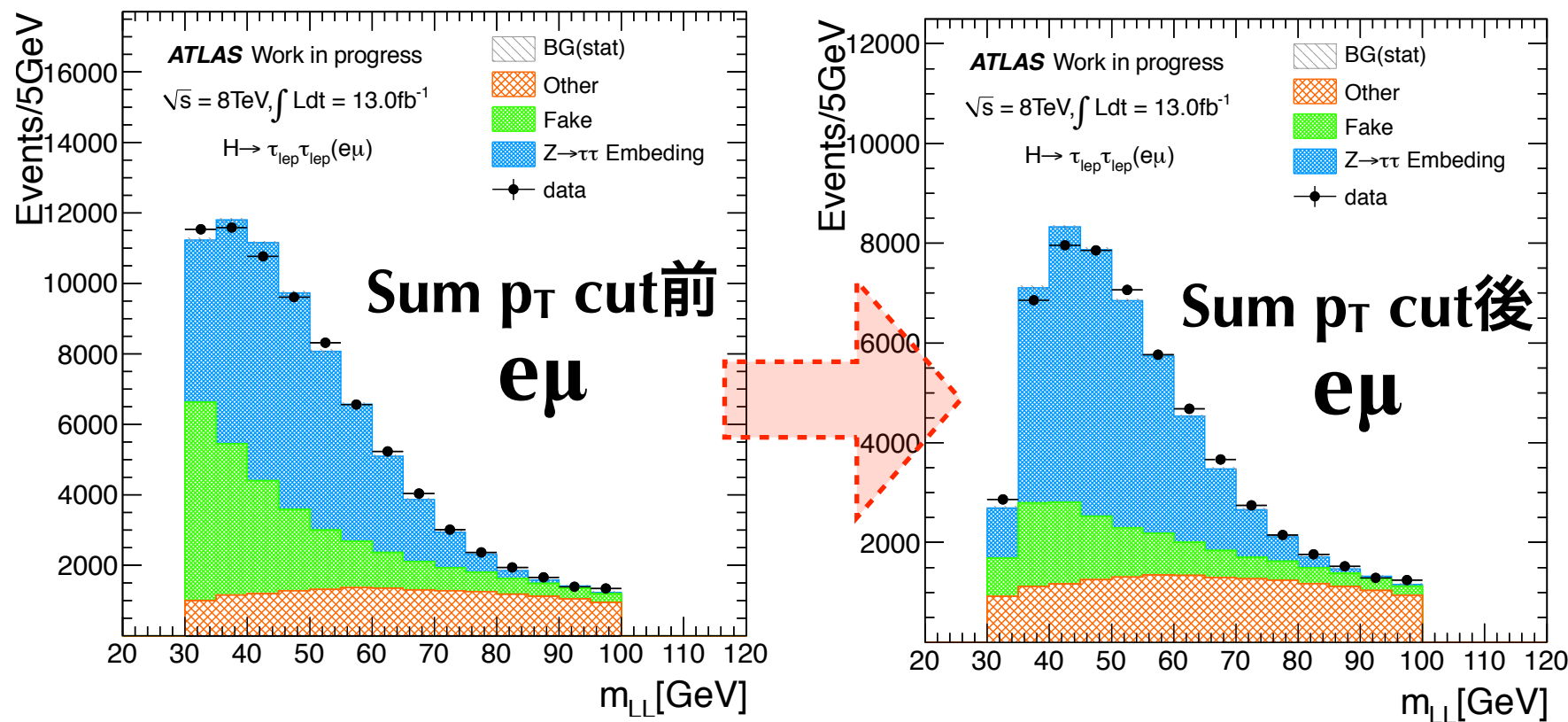
- **Cut7 $0.5 < \Delta\phi_{\ell\ell} < 2.5$:**

- 2つのleptonの ϕ 平面での角度を要求
- Back-to-back事象と,2つのleptonが同一方向の事象を排除する



$Z \rightarrow \tau\tau$ の見積もり

- $Z \rightarrow \tau\tau$ はirreducibleであるため系統誤差を小さくする→Embedding method
- 観測された $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象のmuonをsimulated tau leptonに置き換えて再構成.
- 規格化は $Z \rightarrow \tau\tau$ MCと観測データを用いて3つの方法で行い加重平均をとる.



flavor	factor $\pm$ (stat) $\pm$ (syst)
ee	$0.663 \pm 0.0013 \pm 0.003$
$\mu\mu$	$0.155 \pm 0.090 \pm 0.049$
$e\mu$	$0.209 \pm 0.0002 \pm 0.010$
μe	$0.196 \pm 0.0002 \pm 0.002$

- DF($e\mu, \mu e$)で大きな背景事象→観測データをよく再現している
- 系統誤差: 異なるカットステージで求めた値との比較 (Cut2, Cut3の後).
 - Fake leptonが多い→Fake factorの系統誤差による影響を考慮した.

Top correction

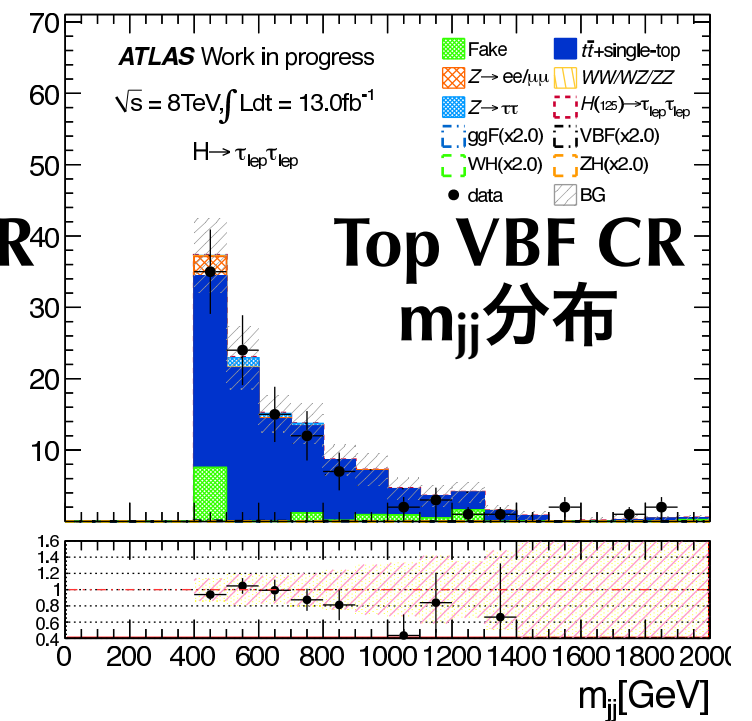
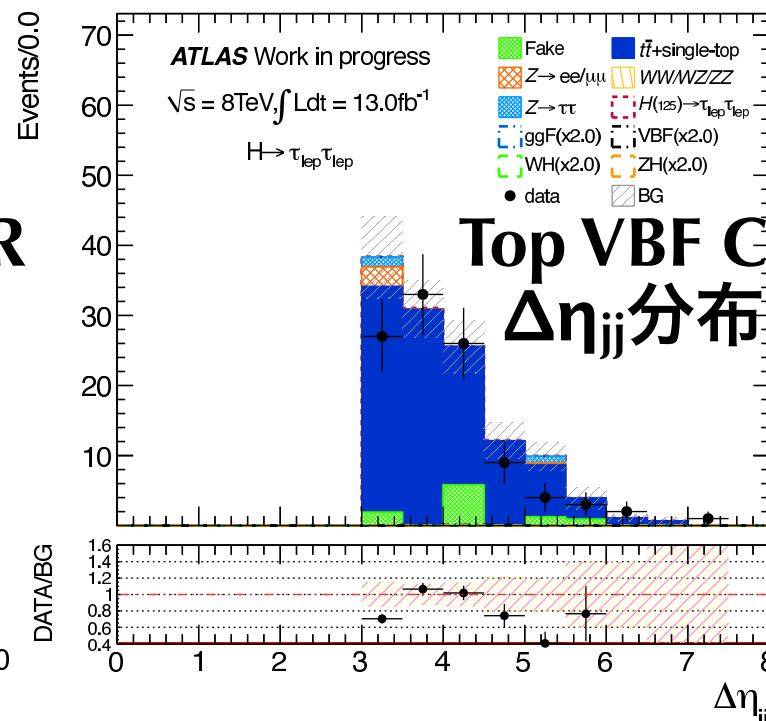
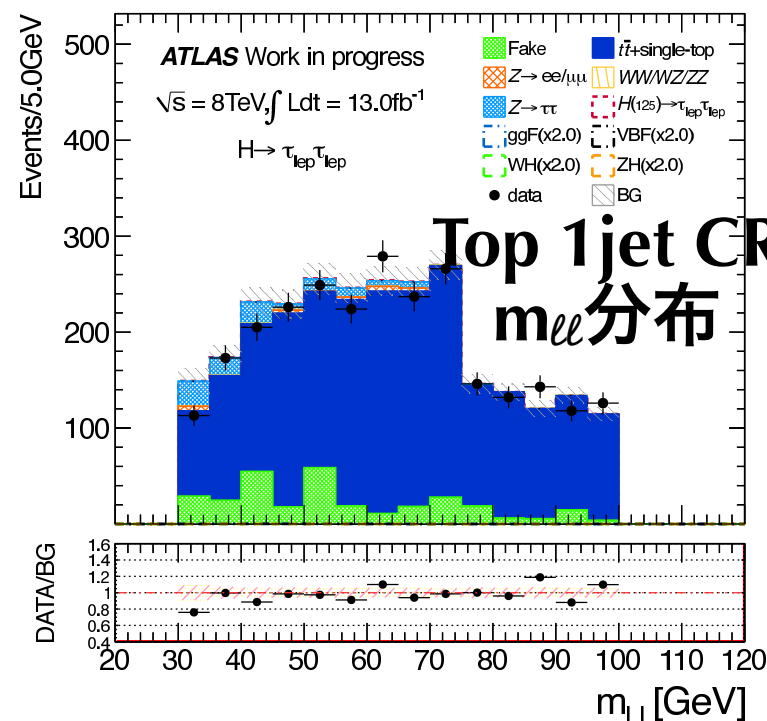
- Top事象(ttbarとsingle top)はb-tagged jetをvetoすることでその大部分が排除可能.
- b-tagged jetを要求することでTop CRを設定し,全てのSRでのTopの事象数を補正した.
 - 補正係数はTop CRでの観測データから他の背景事象の寄与を引いたもののとの比.

$$N_{Est.}^{SR} = N_{Top\ MC}^{SR} \times R_{MC}^{corr},$$

$$R_{MC}^{corr} = \frac{N_{data}^{Top\ CR} - N_{Other\ bkg}^{Top\ CR}}{N_{Top\ MC}^{Top\ CR}}$$

- 系統誤差は,Top CRとSRでの事象数の比から計算した.
- 補正後のTop 1jet/VBF CRでは観測データと良く一致

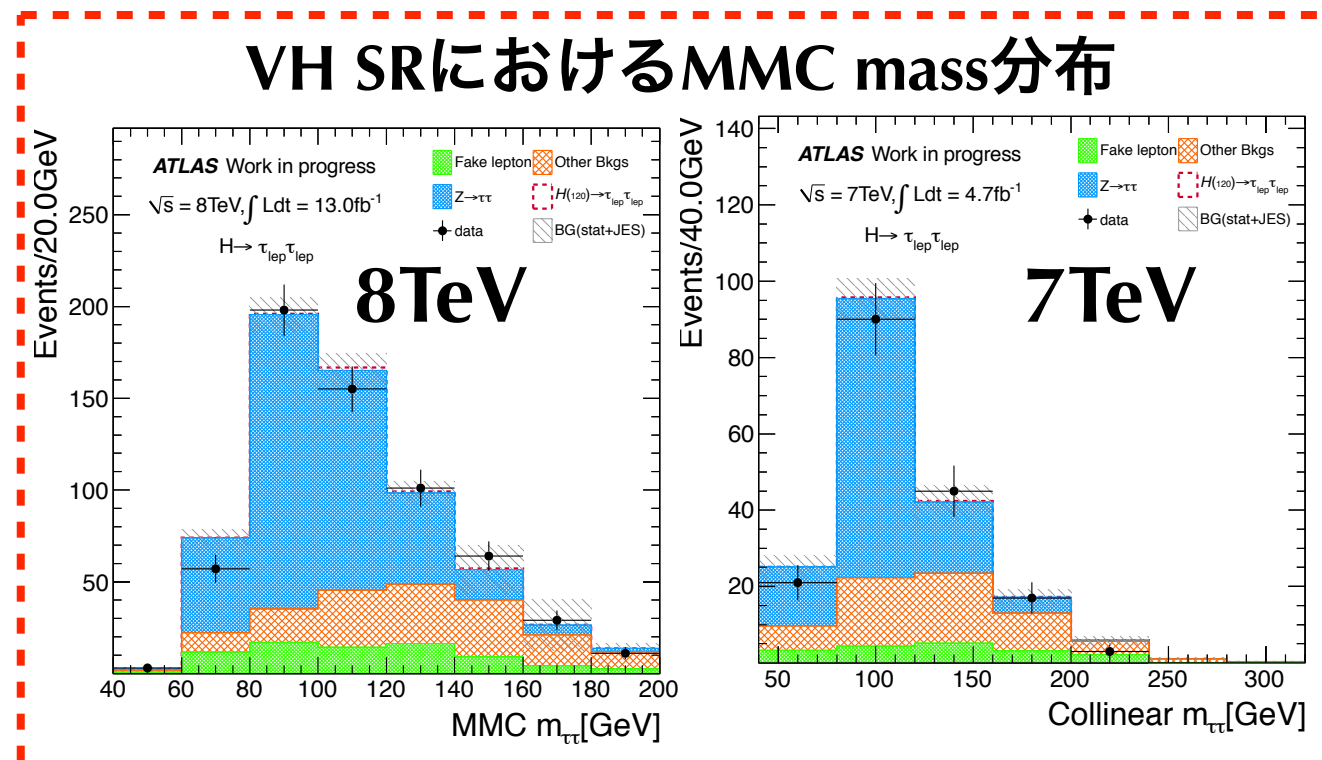
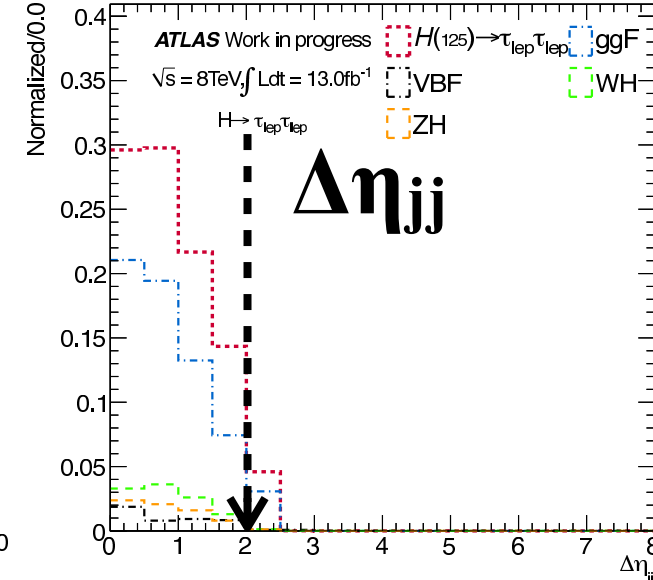
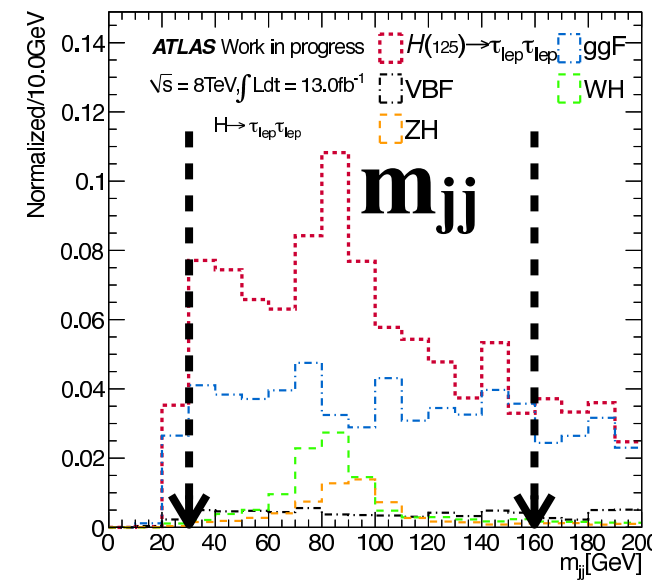
SR	factor $\pm$ (stat) $\pm$ (syst)
VBF	$0.87 \pm 0.01^{+0.18}_{-0.25}$
Boosted	$1.12 \pm 0.05^{+0.07}_{-0.05}$
VH	$1.05 \pm 0.04^{+0.13}_{-0.16}$
1jet	$1.12 \pm 0.03^{+0.16}_{-0.12}$



他のSRでのMMC

2jet VH category

- **Cut8 Boosted SR failed:**
 - 信号事象数を保つためにBoosted SRから排除された事象を選択する
- **Cut9 sub-leading jet tag:**
 - 2つ目のjetをタグしVH signalを選択する。
- **Cut10 $\Delta\eta_{jj} < 2.0$ and Cut11 $30 < m_{jj} < 160 \text{ GeV}$:**
 - タグされた2jet $\rightarrow W/Z$ から崩壊
 - m_{jj} が $m_{W/Z}$ に近い, jet が近いことを要求
- **Cut12 b-tagged jet veto: Top 事象を排除する**



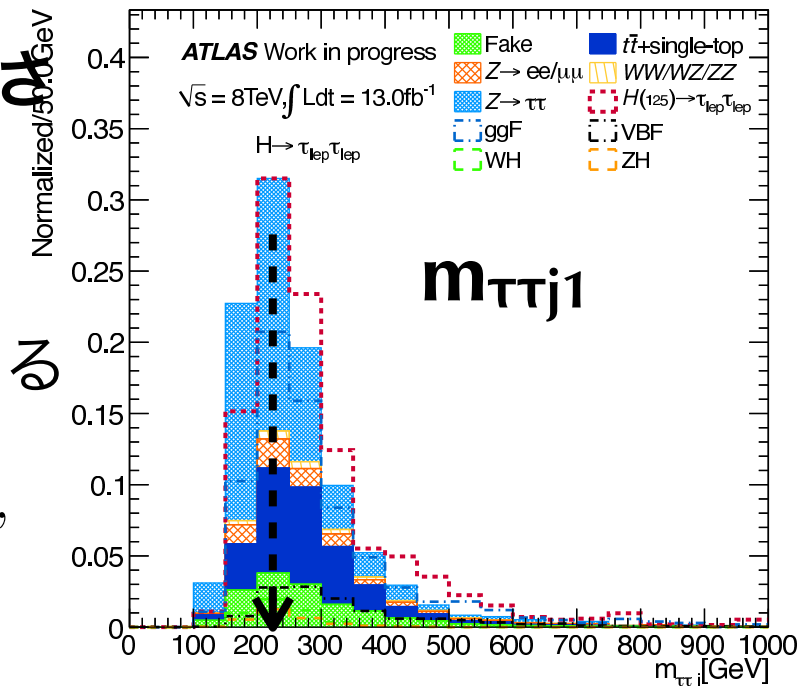
1/0jet category

- 1jetカテゴリーに関して

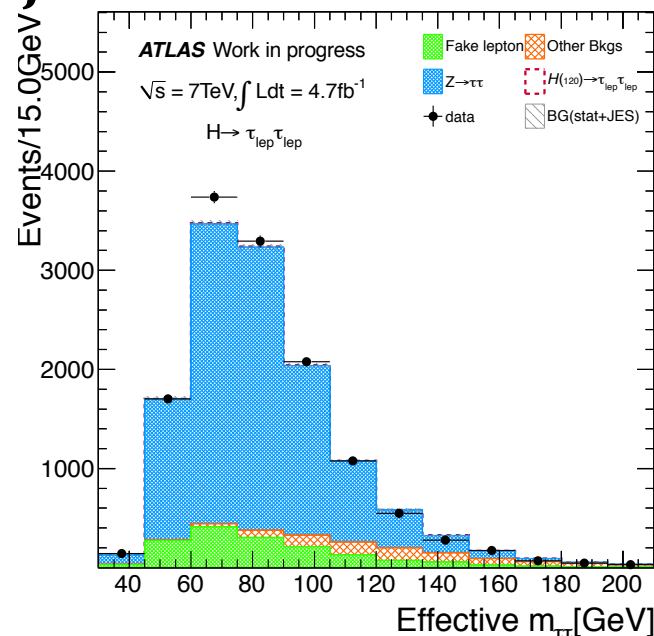
- Cut8 VH SR failed: 信号事象数を保つためにVH SRから排除された事象を選択する
- Cut9 $m_{\tau\tau j1} > 225 \text{ GeV}$:
 - ニュートリノのpZを0として $m_{\tau\tau j1}$ を以下のように定義する

$$m_{\tau\tau j} = \sqrt{(p^{\ell_1} + p^{\ell_2} + p^{j1} + E_T^{\text{miss}})^\lambda (p^{\ell_1} + p^{\ell_2} + p^{j1} + E_T^{\text{miss}})_\lambda},$$

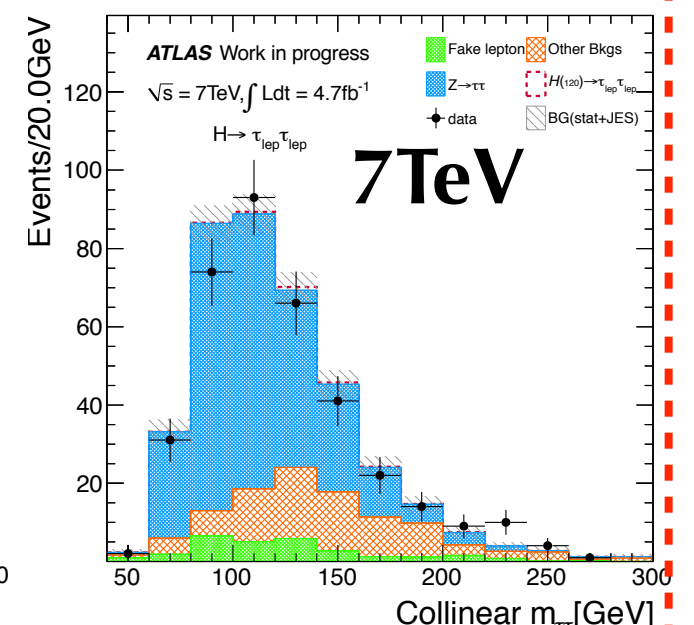
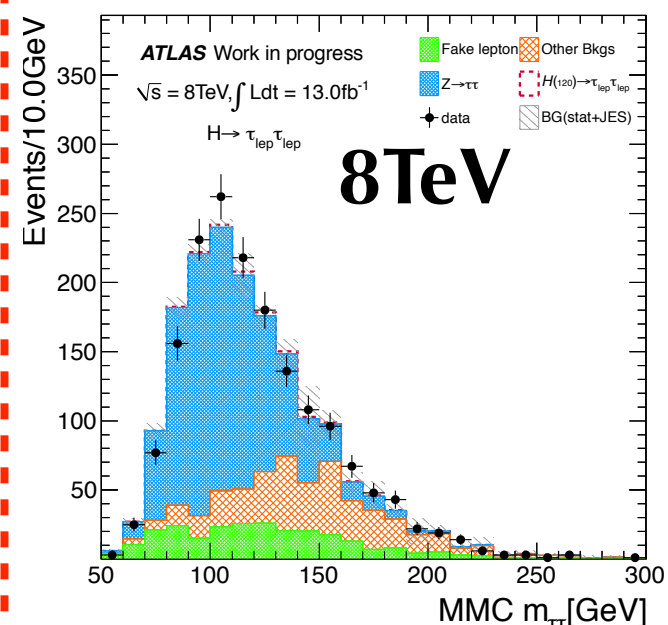
- Cut10 b-tagged jet veto: Top事象を排除する
- 0jetカテゴリー: 2011年データの $e\mu$ flavorのみ, Cut4を通らなかった事象に対して, $\Delta\phi_{\ell\ell} > 2.5$ と b-tagged jet veto を要求.



1jet SRにおける質量分布

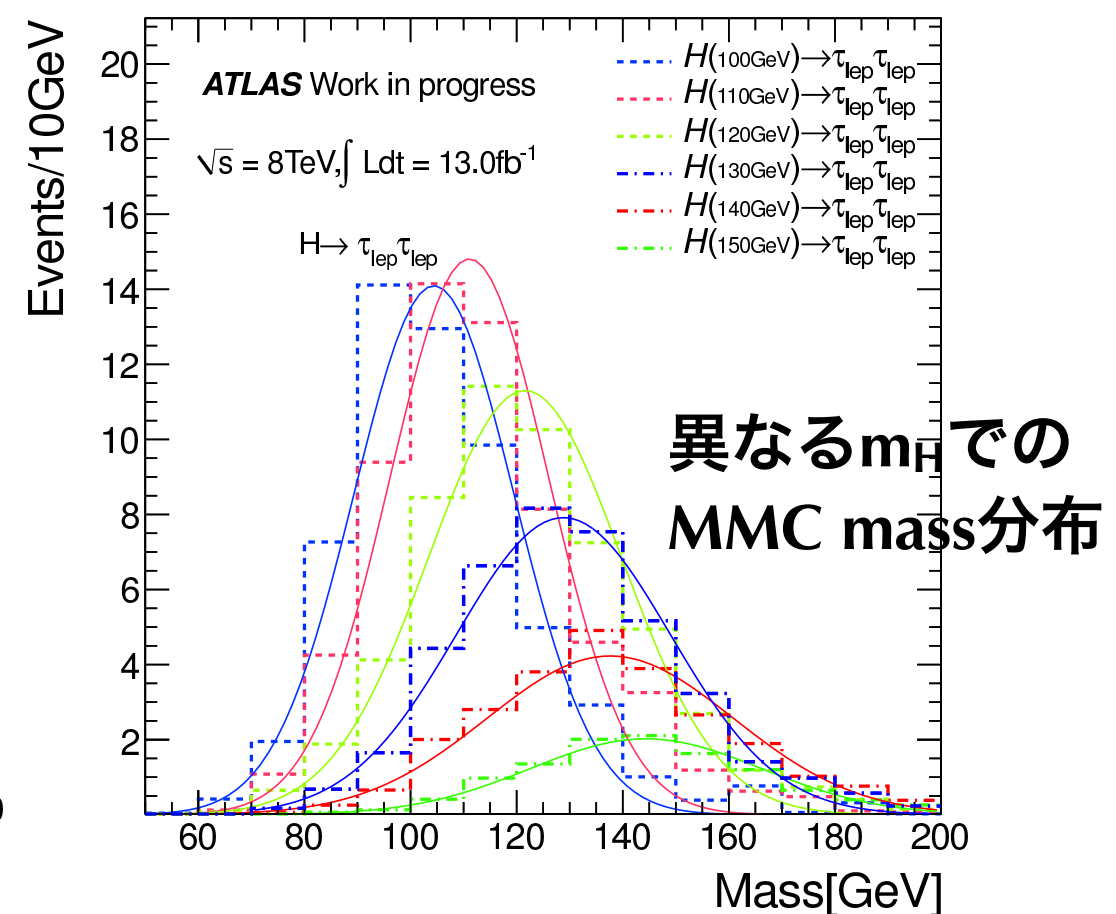
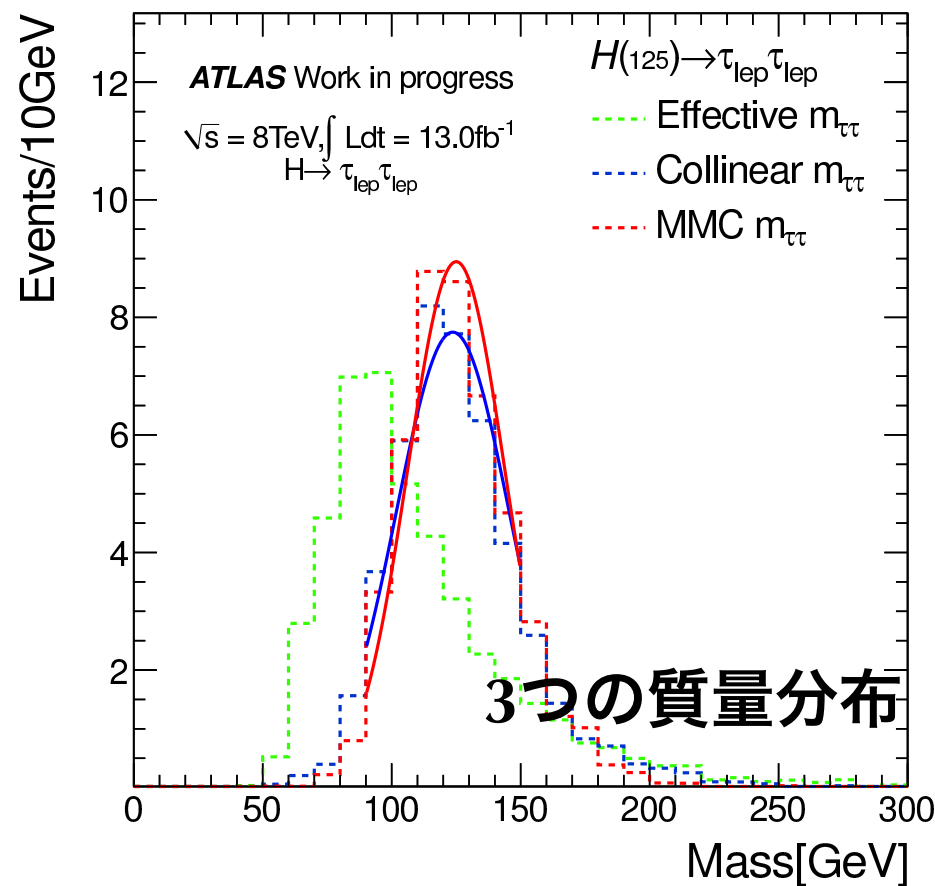


1jet SRにおける質量分布



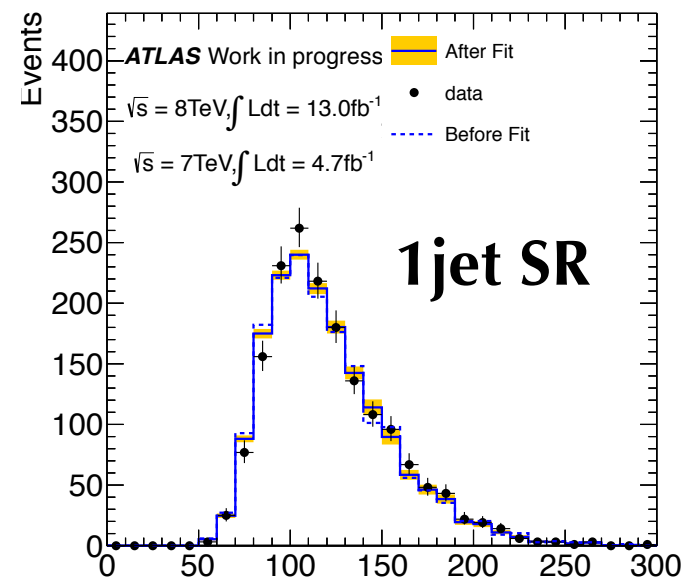
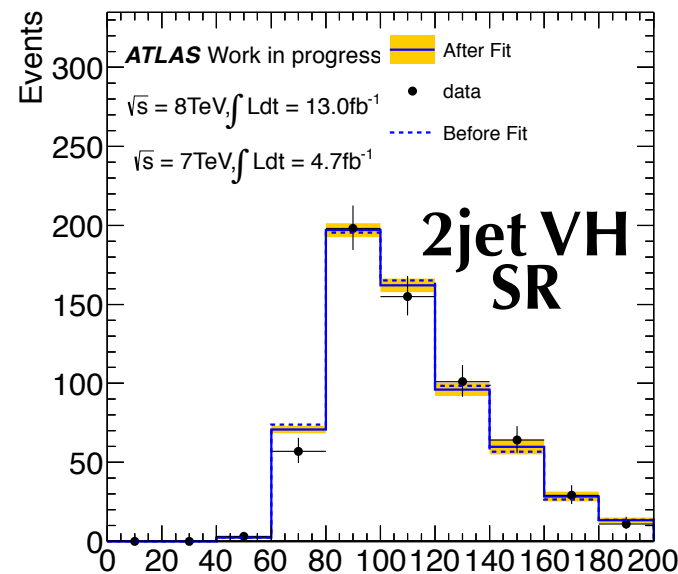
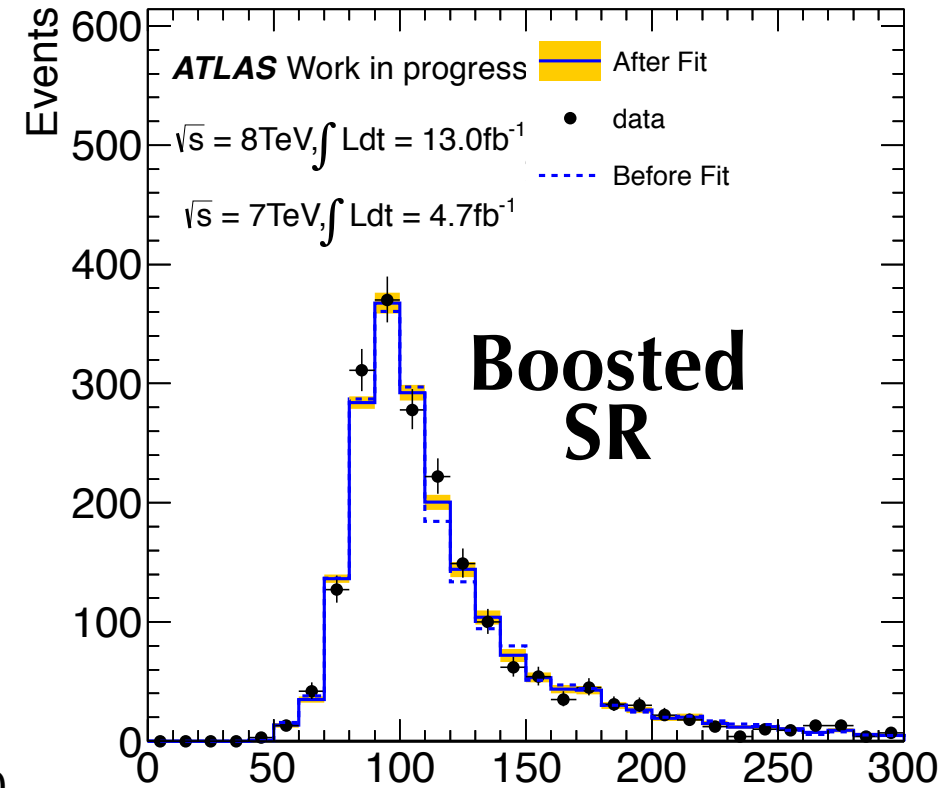
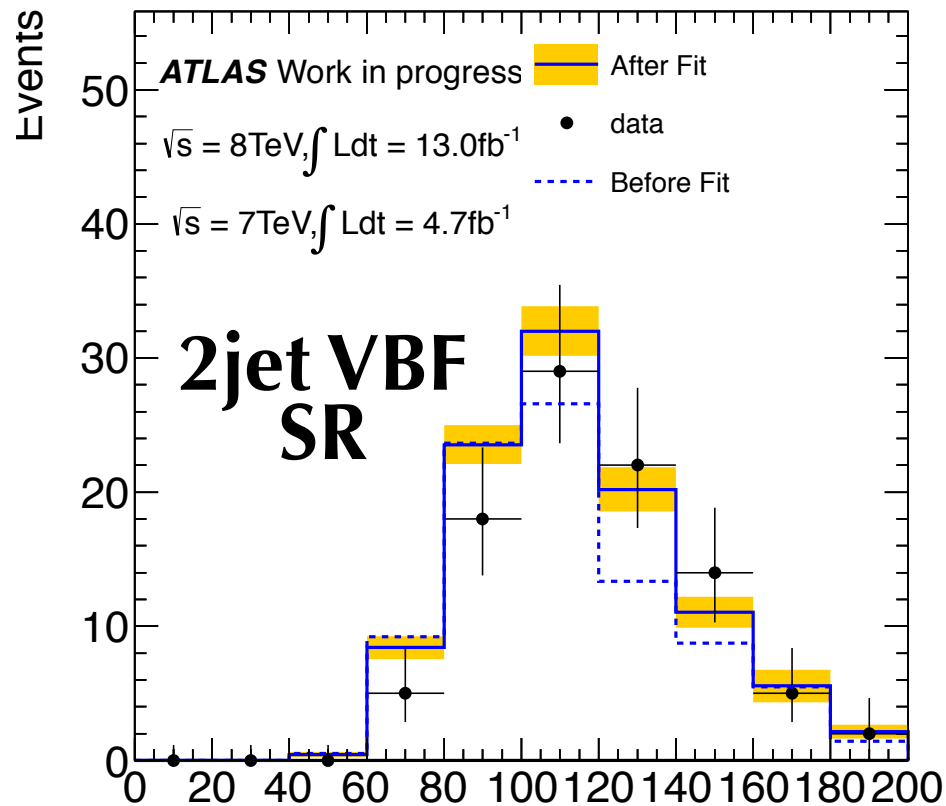
Mass reconstruction

- **Collinear mass:** Collinear近似を用いて再構成した質量 $m_{\tau\tau}^{\text{coll}} = \frac{m_{\ell\ell}}{\sqrt{x_1 x_2}}$
- **Effective mass:** ニュートリノのpZを0とした質量 $m_{\tau\tau}^{\text{eff}} = \sqrt{(p^{\ell_1} + p^{\ell_2} + E_T^{\text{miss}})^\lambda (p^{\ell_1} + p^{\ell_2} + E_T^{\text{miss}})_\lambda}$
- **MMC(Missing Mass Calculator) mass:**
 - Tau leptonのleptonic崩壊において生成されるニュートリノとleptonの3次元的な角度(θ_{3D})をPDF(確率密度関数)にもつLikelihoodを用いて再構成した質量



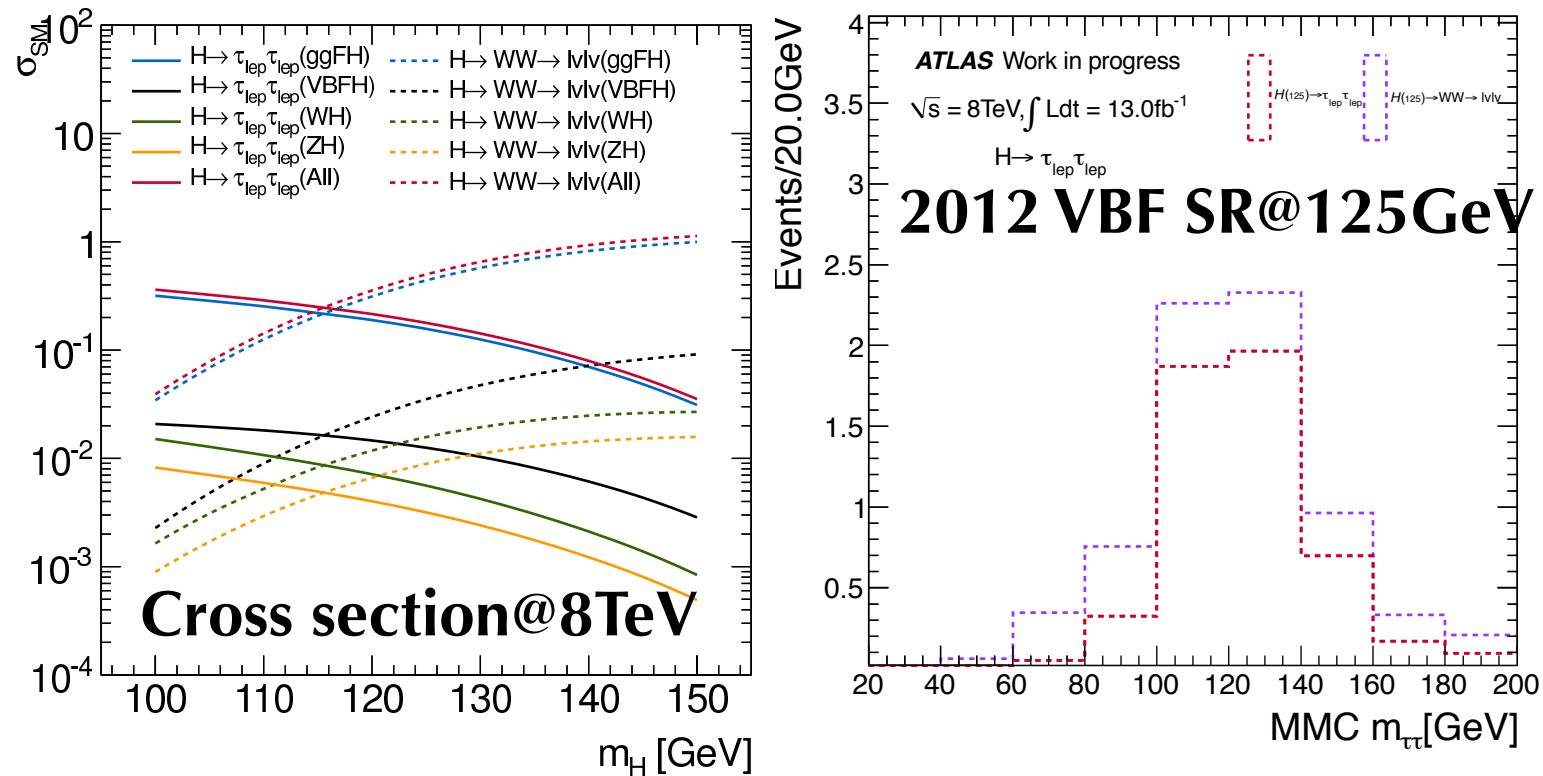
Profile Likelihood Fit

- Profile Likelihood Fit:



$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

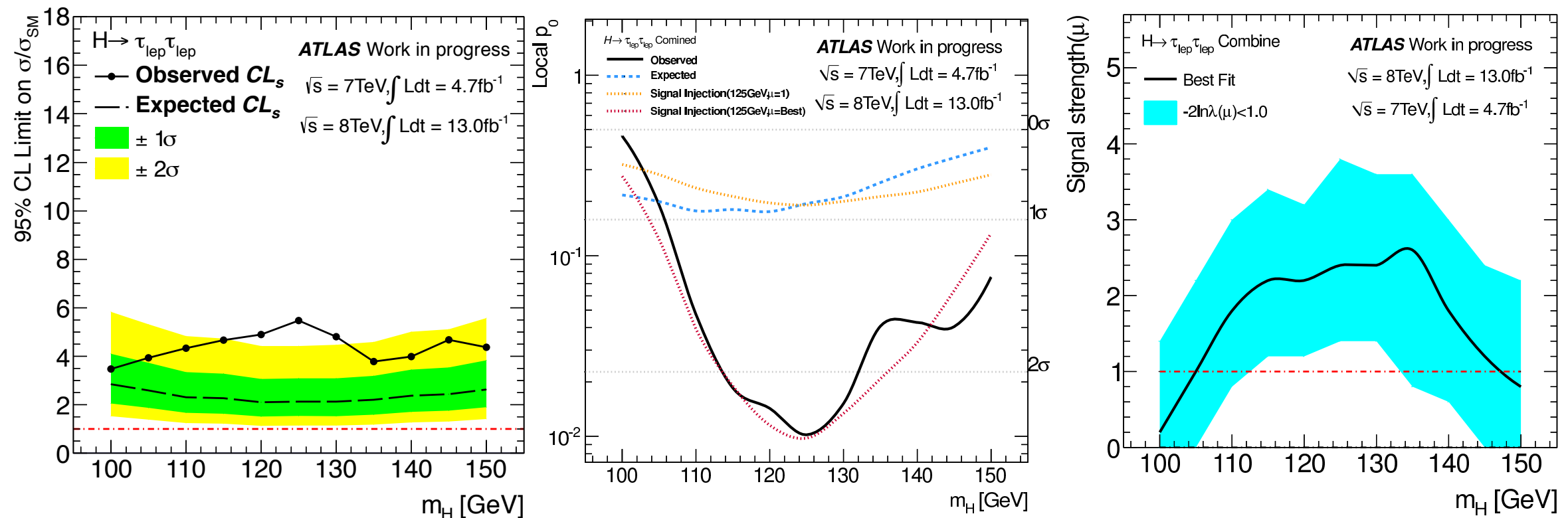
- 他のHiggs粒子,特に125GeVで大きな崩壊分岐比(本解析チャンネルの約3倍)を持つ $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ の信号事象を考慮した.



- VBF SRへの15%程度の寄与が見て取れる.
- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 信号事象もフィットに含めて CL_s 制限を付ける
- 本解析では $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 信号事象を含めて最終結果を出す.

$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ as Higgs Signals

- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 信号事象を考慮して, 2011年と2012年の全てのSRをフィットした



- 結果, 125GeVの質量点に対して生成断面積に対して信頼度95%で約6倍の制限を付けた.
- 超過事象の優位性は約 2.3σ が得られた.
- Signal strength(μ)についてフィットした結果, ベストフィットは125GeVに対し, $\mu = 2.4^{+1.4}_{-1.0}$ となった.

	Combined	VBF	Non VBF	Other	Bst	VH	1jet
Signal strength $\mu \pm 1\sigma$	$2.4^{+1.4}_{-1.0}$	$2.4^{+3.4}_{-2.4}$	$4.4^{+2.4}_{-2.0}$	$2.4^{+1.2}_{-1.4}$	$5.0^{+2.6}_{-2.2}$	$5.4^{+4.8}_{-4.4}$	$4.6^{+9.8}_{-4.6}$