

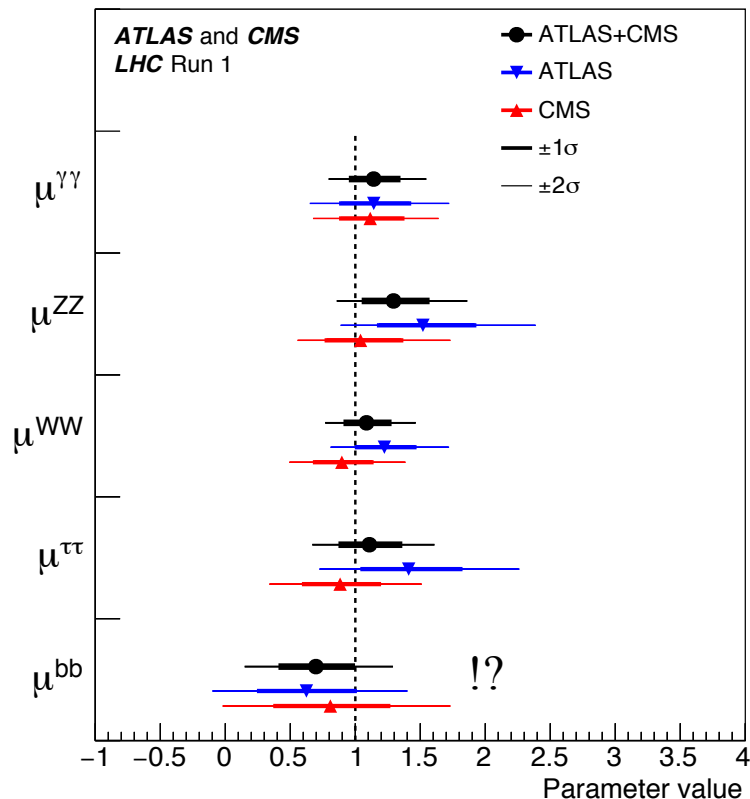
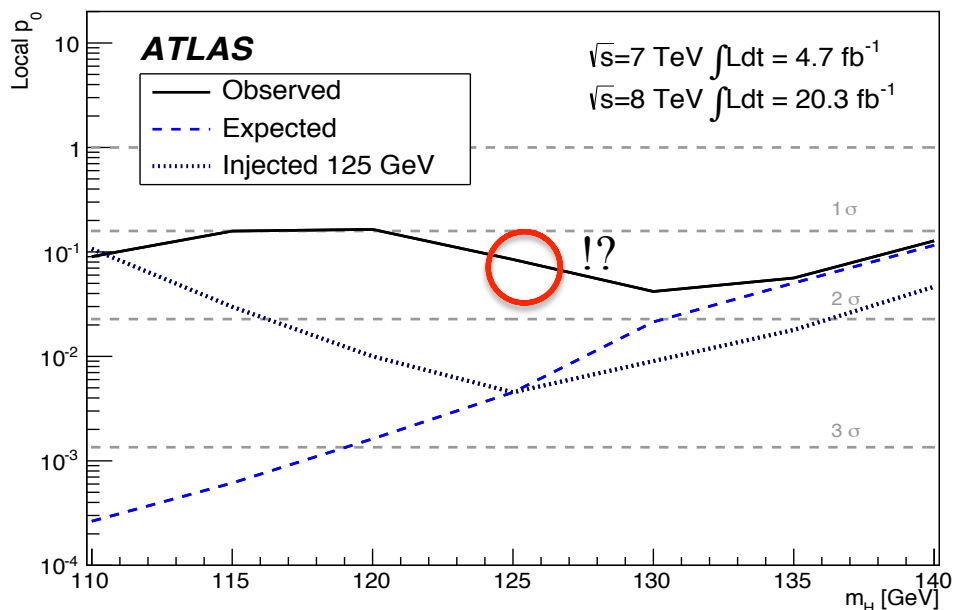
Evidence for the Higgs boson decaying to a  
pair of  $b$  quarks

( $b$  クォーク対に崩壊するヒッグス粒子の証拠)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻  
博士課程 4 年 加藤千曲

# Introduction

arXiv:1409.6212  
 arXiv:1310.3687  
 arXiv:1606.02266

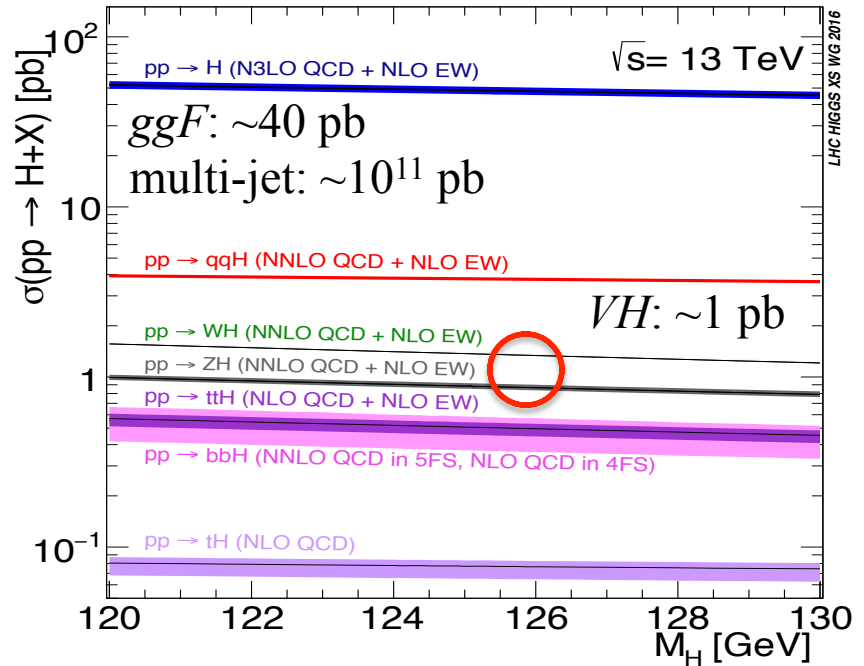
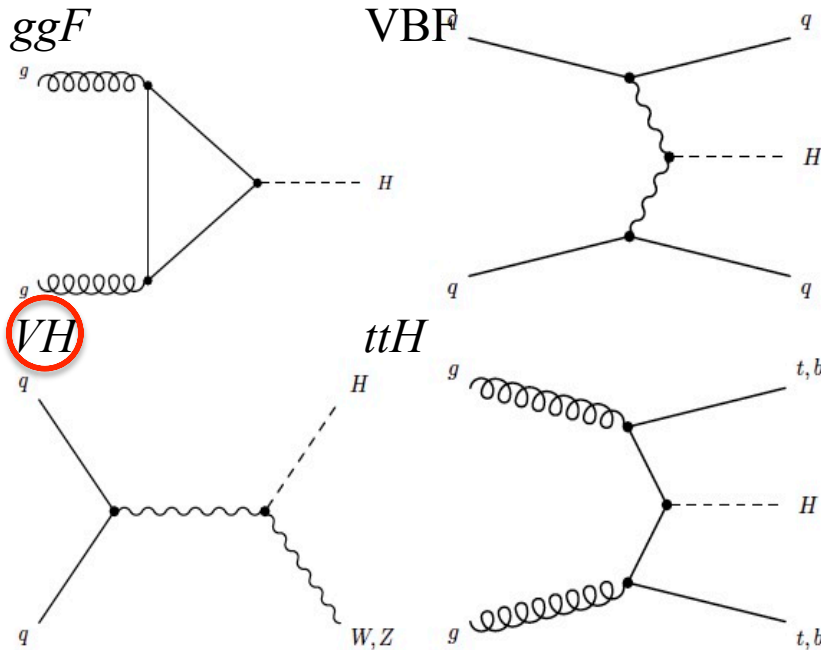


生成断面積:  $\sigma$ , 崩壊分岐比: BR,  
 信号強度:  $\mu = (\sigma \times BR) / (\sigma_{SM} \times BR_{SM})$

- ヒッグス粒子は 2012 年 ATLAS と CMS 実験 Run1 で発見された
- 質量は 125 GeV, 性質はこれまでのところ標準模型と無矛盾である
- しかし, 58% の崩壊分岐比を持つ  $H \rightarrow bb$  は Run1 で発見されず, 2015 年からの Run2 の重要課題である

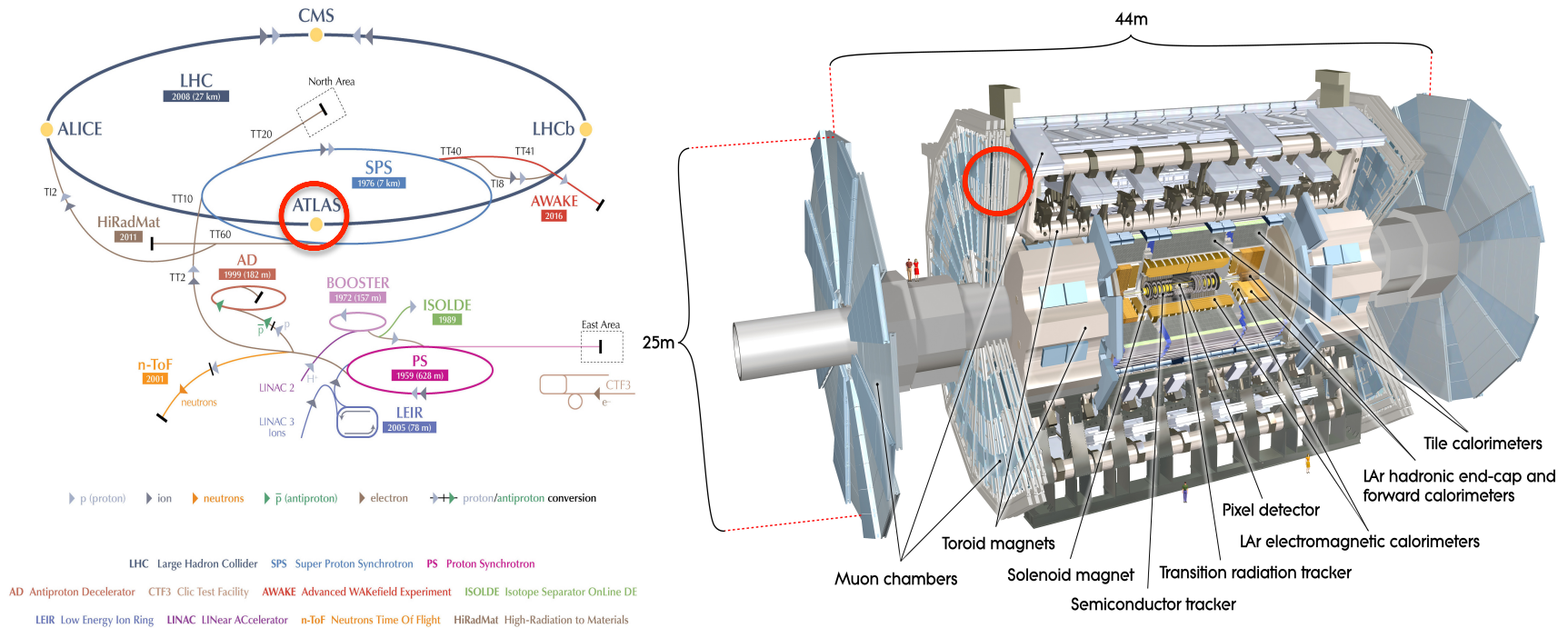
# どう $H \rightarrow bb$ を探すか

arXiv:1610.07922



- 最も大きい生成断面積を持つ  $ggF$  と  $VBF$  は  $H \rightarrow bb$  の感度が低い
  - Multi-jet 背景事象と区別が難しい
- そこで、終状態の lepton を用いて信号を選び出せる  $VH$  が  $H \rightarrow bb$  の感度が最も良いチャンネルになる
  - 本研究は 3 つの  $VH$  チャンネル:  $ZH \rightarrow \nu b b$  (0-lepton),  $WH \rightarrow l \nu b b$  (1-lepton),  $ZH \rightarrow l l b b$  (2-lepton) のうち 2-lepton を主に探索する

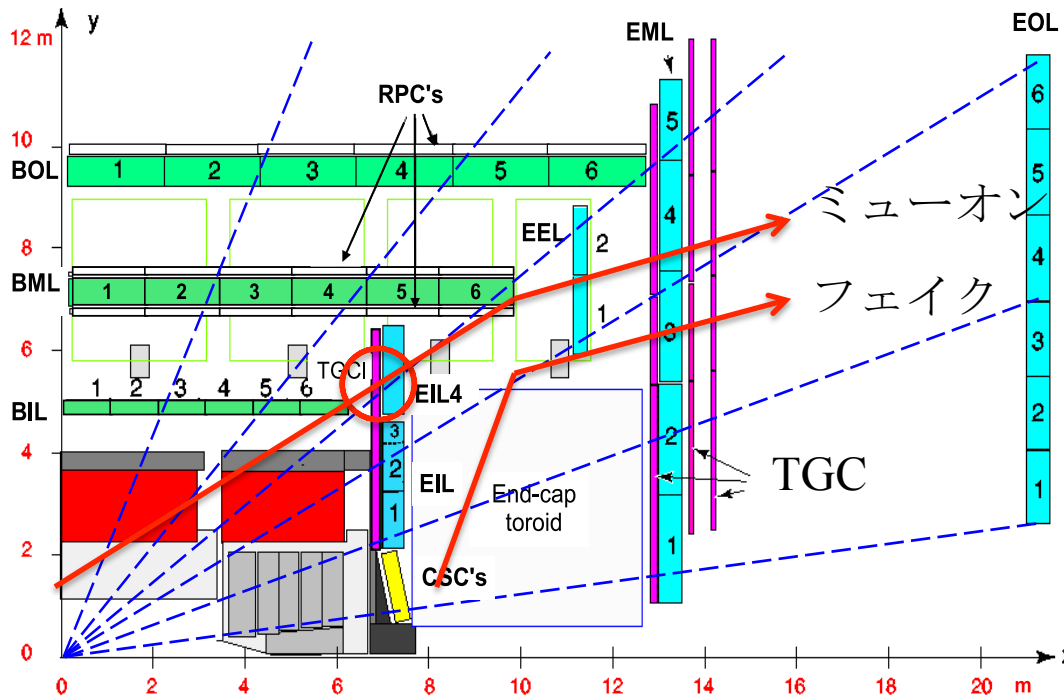
# LHC-ATLAS 実験



- LHC 陽子陽子衝突型加速器 (左): 重心系エネルギー = 13 TeV, ピークルミノシティ =  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , バンチ衝突頻度 = 40 MHz
- ATLAS 検出器 (右): 内部飛跡検出器, 電磁カロリメーター (LAr), ハドロンカロリメーター (Tile), ミューオンスペクトロメーター, ソレノイド磁石 (2T), トロイド磁石 (1T)
  - トリガー要求: Level-1 trigger  $\sim$  100 kHz, High Level Trigger  $\sim$  1 kHz



# Level-1 エンドキャップミュオントリガー

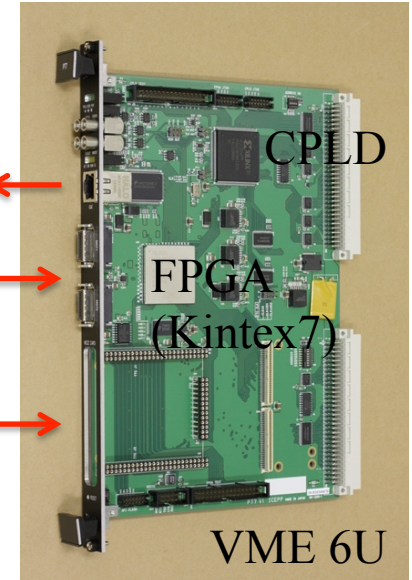


新しいトリガー装置試作機

1 Gbps output

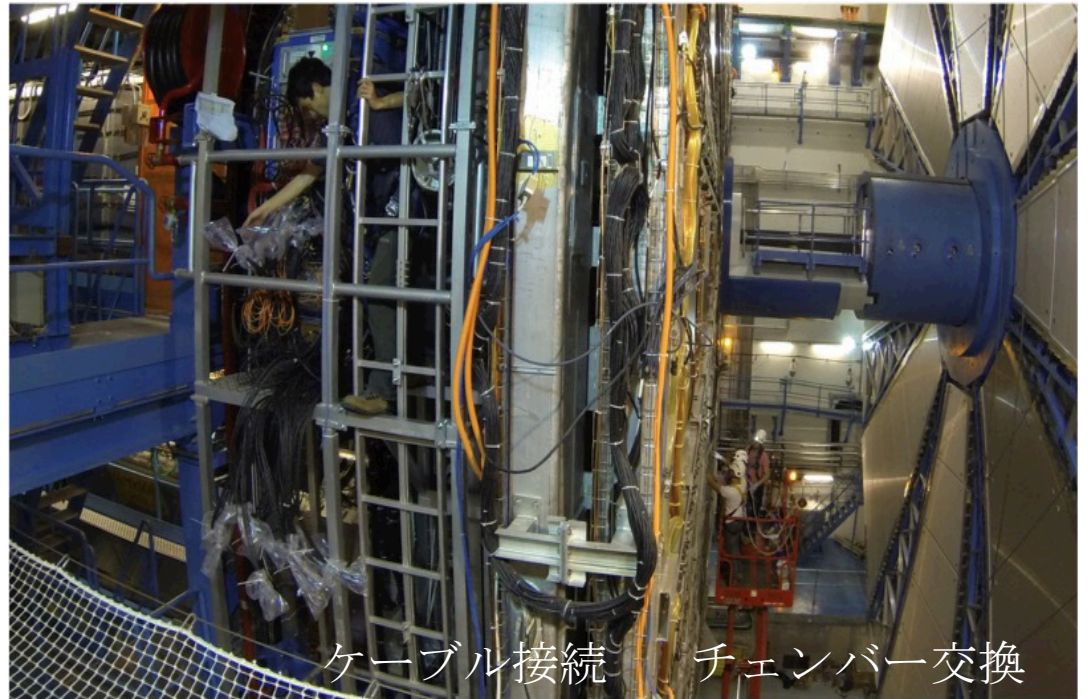
80 Gbps input

Timing trigger



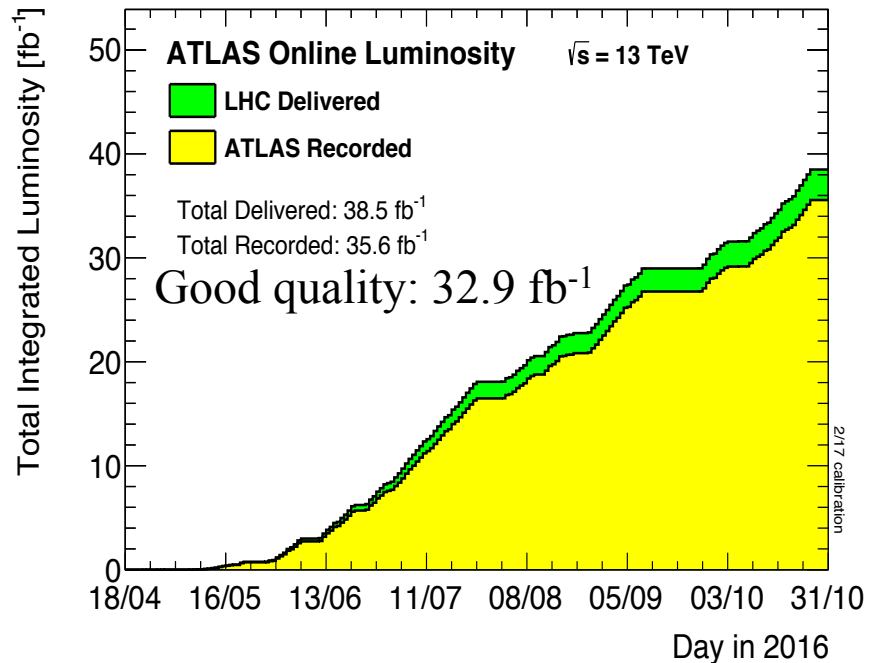
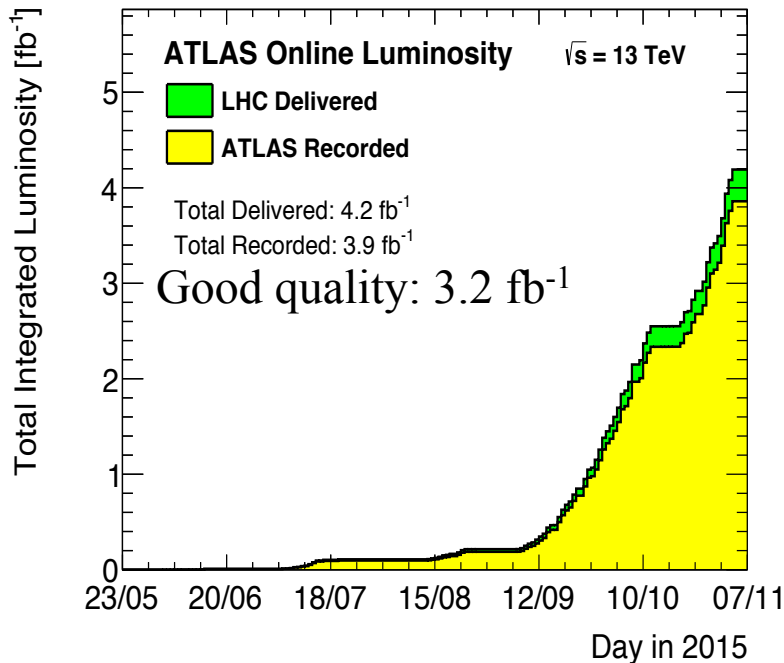
- Thin Gap Chamber (TGC) システム:  $|\eta| = 1.05\text{--}2.4$
- ミューオンの横運動量 ( $p_T$ ) をハードウェアで素早く判定し  $p_T > 20$  GeV の事象を選び出す (トリガー要求:  $\sim 20$  kHz)
- トリガーの多くは陽子や low- $p_T$  ミューオンによるフェイクである
- Run2 から内側の検出器のコインシデンスを要求することでフェイクを約 20% 削減し、データ取得を可能にした

# Run2 に向けた TGC の準備



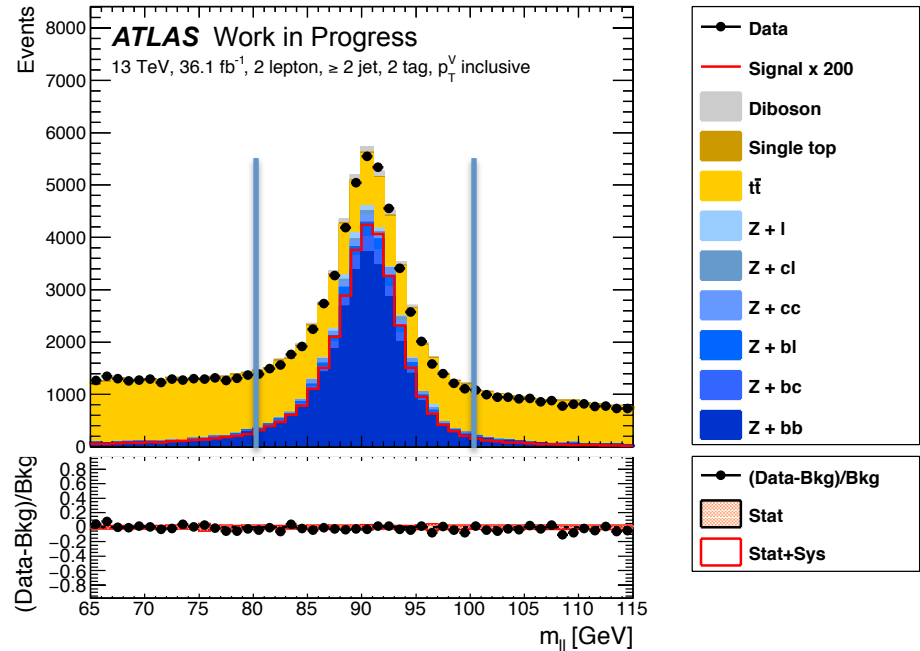
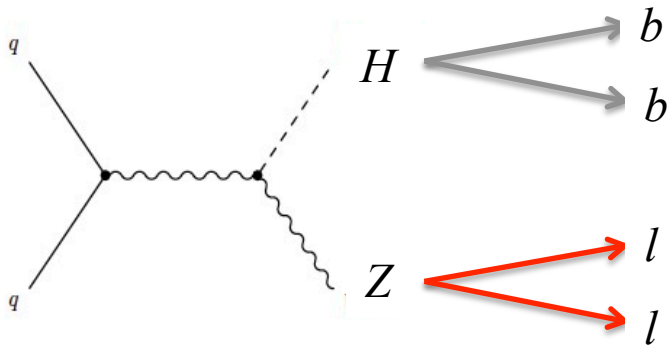
- 2012 年 Weizmann 研究所にて (左), Run2 に向けて壊れたチャンバーを交換するため, 新しいチェンバーを製作した
- 2014 年 CERN にて (右), TGC 構造を分離して, 壊れたチャンバーや読み出し装置を交換し, 約 90% のトリガー効率を実現した
- (2016 年まで CERN にて, データ取得中の問題に対処するオンコールシフトに参加した)

# 2015年と2016年のデータ



- 積分ルミノシティ:  $3.2 + 32.9 = 36.1 \text{ fb}^{-1} @ 13 \text{ TeV}$ 
  - ピークルミノシティ:  $1.38 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (2016年に到達した)
  - バンチ交差あたりの平均事象数 ( $\langle \mu \rangle$ ): 24.9
- レプトントリガー閾値:  $24 \rightarrow 26 \text{ GeV}$  (データ取得の限界からレプトントリガーの閾値を上げたが, 本研究の感度に影響はない)

# Analysis overview



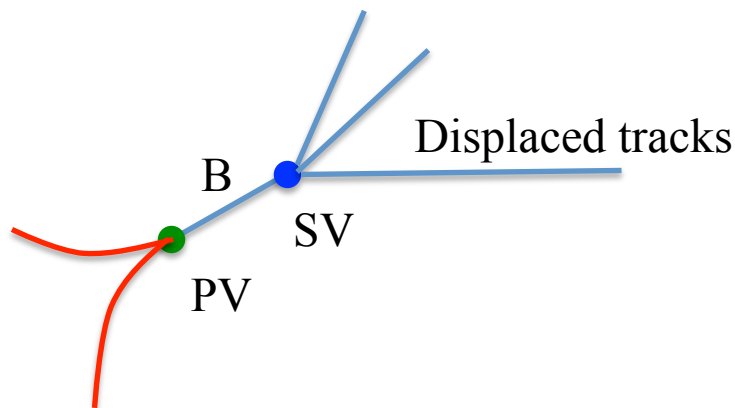
- 2 lepton と 2 b-jet を要求する (左)
  - 2 lepton は  $m_{ll} = 81-101$  GeV を要求する (右)
  - 2 b-jet は b-tag 効率 70% を要求する
- Z+jets (青) と tt (黄) はモンテカルロシミュレーション (MC) とデータで見積もる
- Diboson (灰) と single top (橙) は MC で見積もる
- Multi-jet はデータで見積もる
- 多変量解析 (メイン) とカット解析 (確認) を行う

# $b$ -jet identification

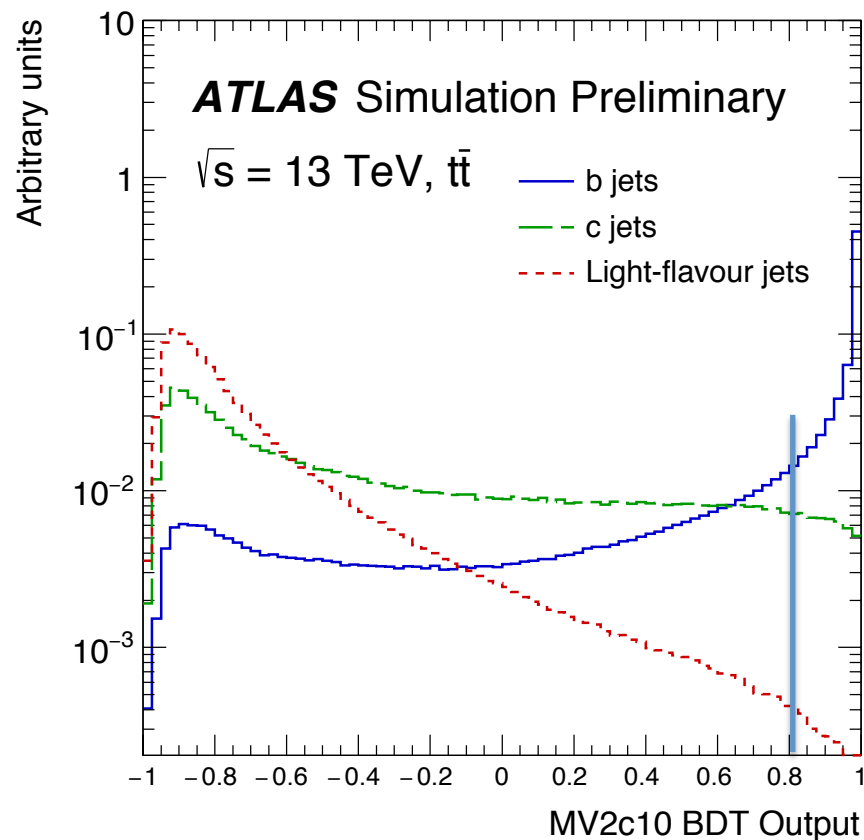
arXiv:1512.01094

ATL-PHYS-PUB-2015-022

ATL-PHYS-PUB-2016-012

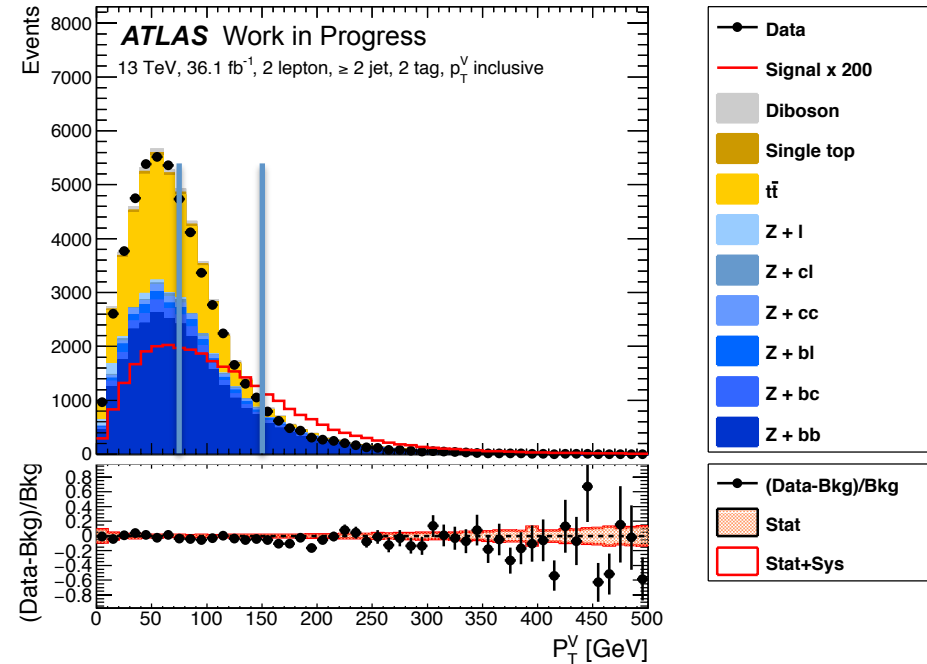
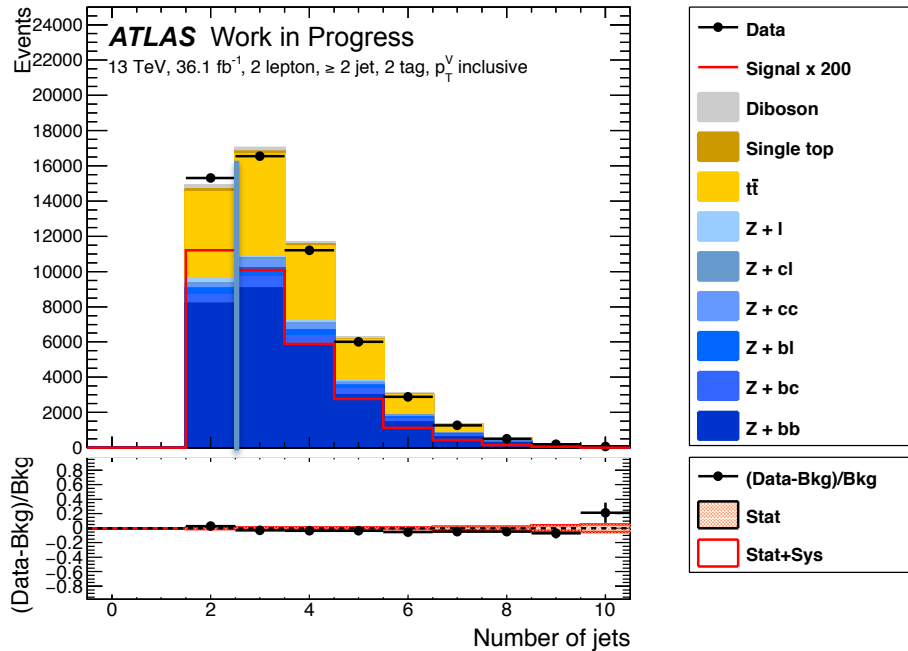


- $b$  ハドロンの寿命は  $\sim 1.5$  ps,  $c\tau \sim 450$   $\mu\text{m}$  と長いいため impact parameter (IP) や Secondary Vertex (SV) などの情報から BDT で識別できる (右)
- 24 ある変数の例は以下である
  - SV の質量
  - SV に使われた track 数
  - SV と PV の距離



- $b$ -tag 効率 70% を要求する
  - Purity は約 97% で c-jet 排除率は約 12, light-jet 排除率は約 381 である

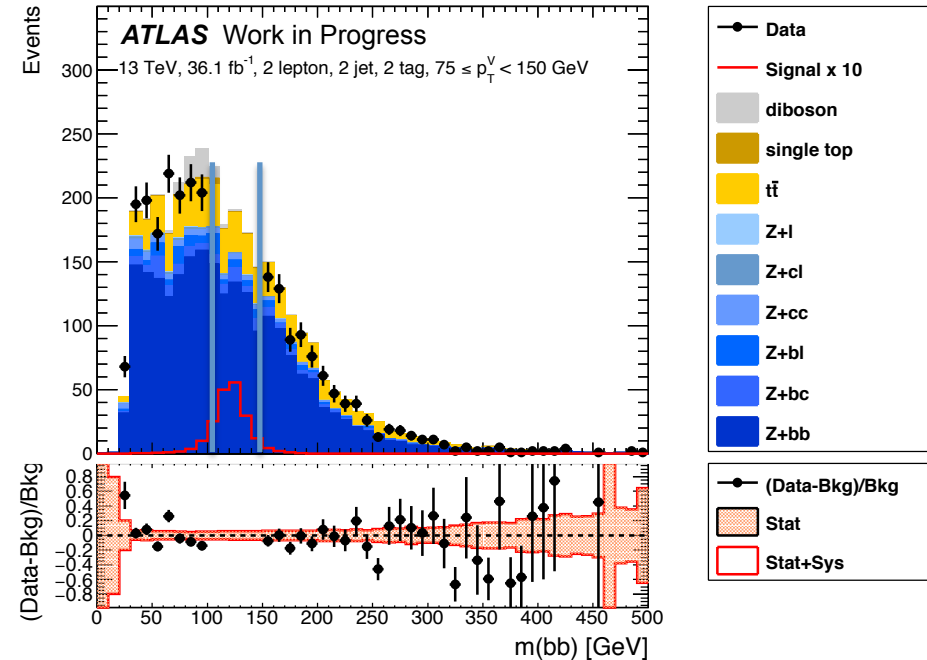
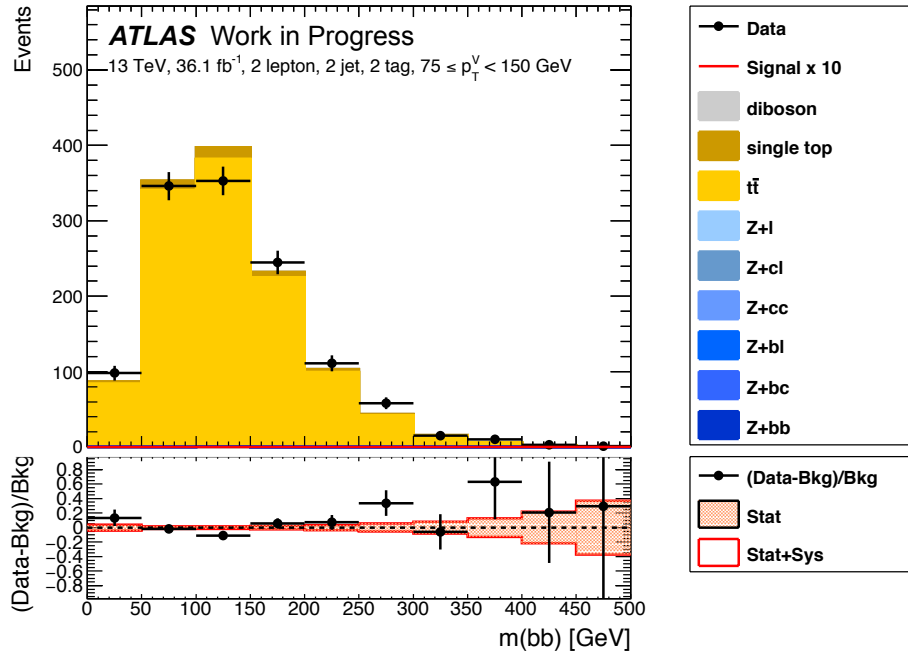
# Event categorization



- Jet 数 (左) と  $p_T^V$  (右) で事象を分類して感度を上げる
  - 2 jet, high  $p_T^V$  の感度が良い
- Lepton の flavor でさらに分類する
  - Signal Region (SR):  $ee, \mu\mu$ , ( $\mu\mu$  は反対電荷を要求)
  - top Control Region (CR):  $e\mu$  (反対電荷を要求)

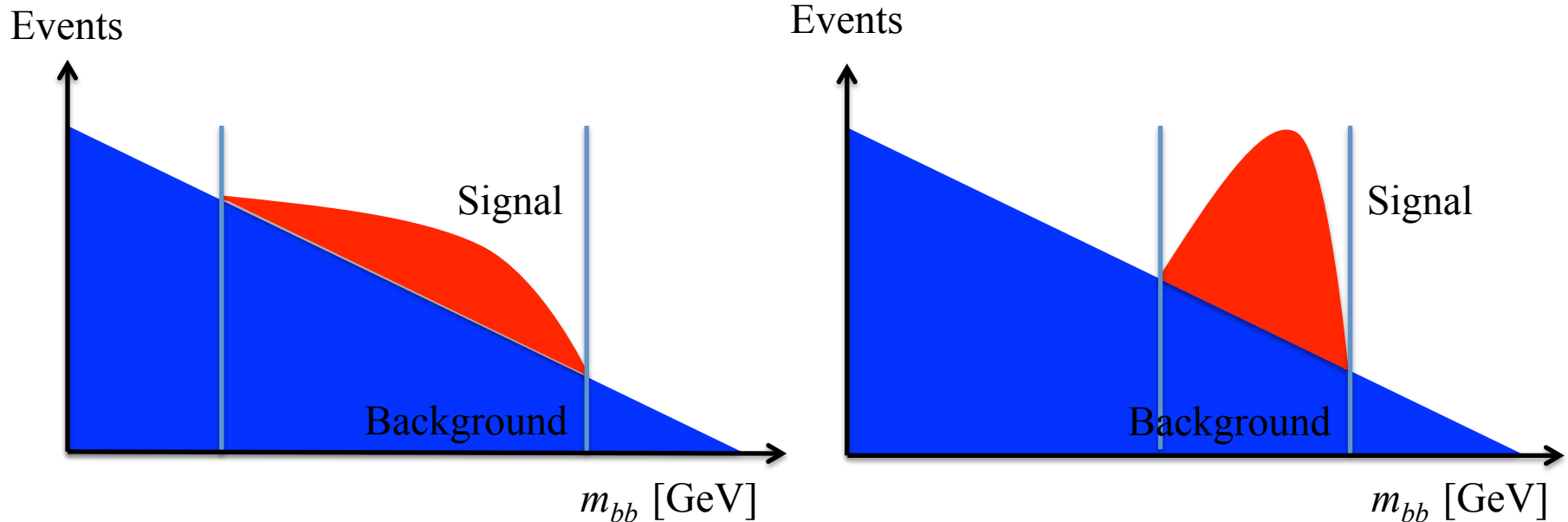


# Background estimation



- Z+jets (青) と tt (黄) は MC とデータで見積もる
  - top CR (左) で tt の normalization や分布を求める
    - top CR はまだデータ統計が少ないので, 2 jet high-p<sub>T</sub><sup>V</sup> は 1 bin, そのほかの region では 50 GeV bin にして使う
  - m<sub>bb</sub> sideband (右) で Z+jets の normalization や分布を求める

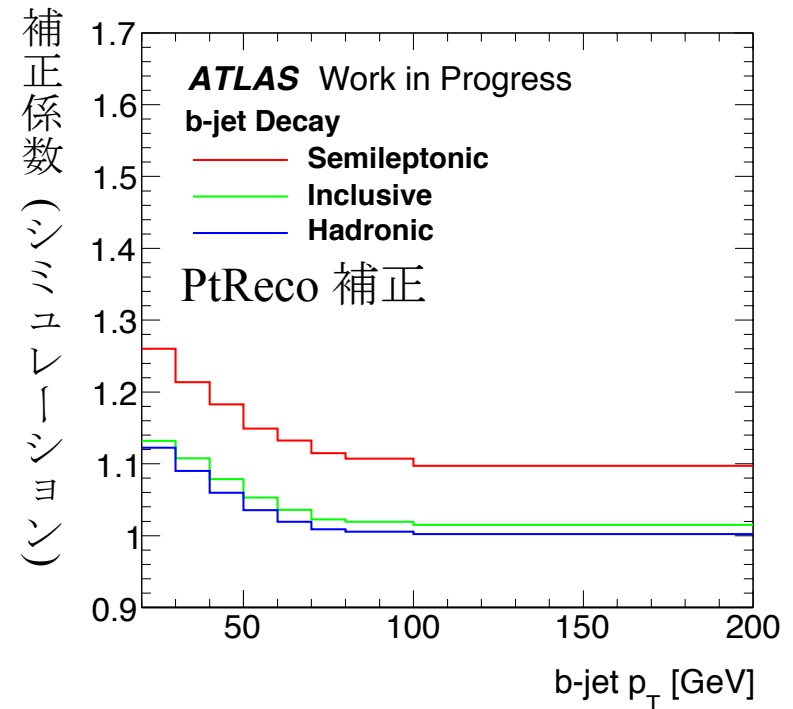
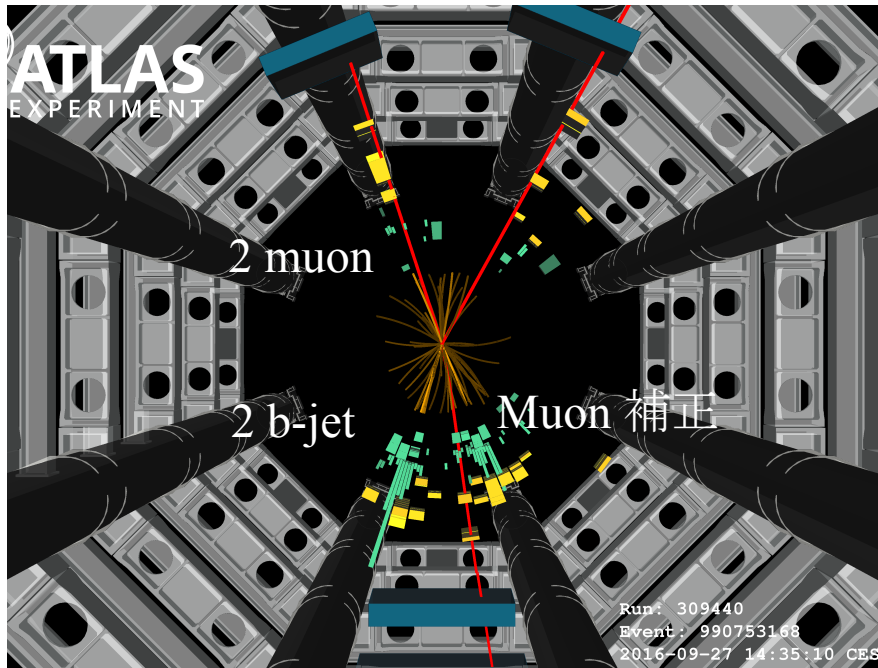
# $m_{bb}$ 分解能を改善したい



- $H \rightarrow bb$  信号は  $m_{bb}$  分布における bump として観測される
- しかし, 標準的な jet エネルギー較正 (GSC) は  $b$ -jet に最適化されておらず, 信号の  $m_{bb}$  分解能が悪化する
  - $b$ -jet は semileptonic decay や out-of-cone などの特徴を持つ
- $b$ -jet エネルギー補正を研究し  $m_{bb}$  分解能を改善したい



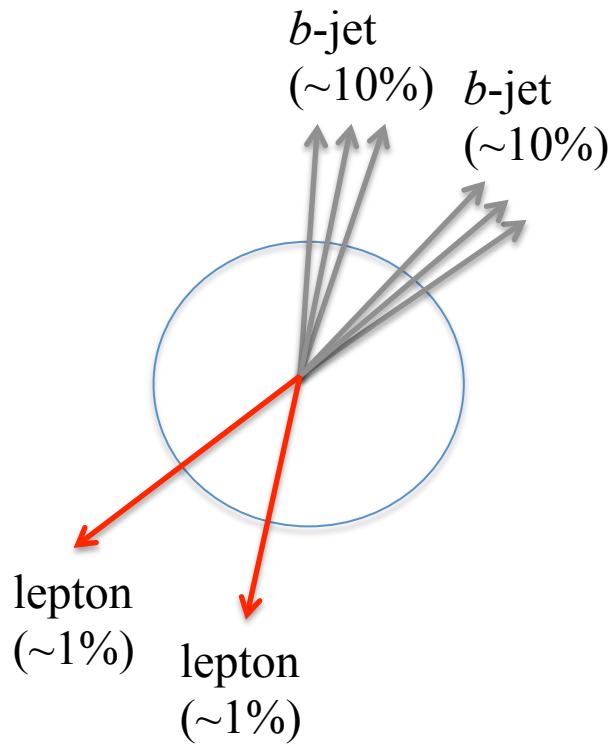
# $b$ -jet エネルギー補正 (Muon, PtReco)



- Muon 補正: Semileptonic decay 由来のミュオンがカロリメーターの外に持ち出したエネルギーを jet に足す
- PtReco 補正:  $b$ -jet は low- $p_T$  で out-of-cone などの影響が大きく  $p_T$  応答が低いため  $p_T$  に依存した補正をかける
  - Semileptonic decay を tag した場合, ニュートリノの影響を考慮してより大きな補正をかける (右図の赤線)

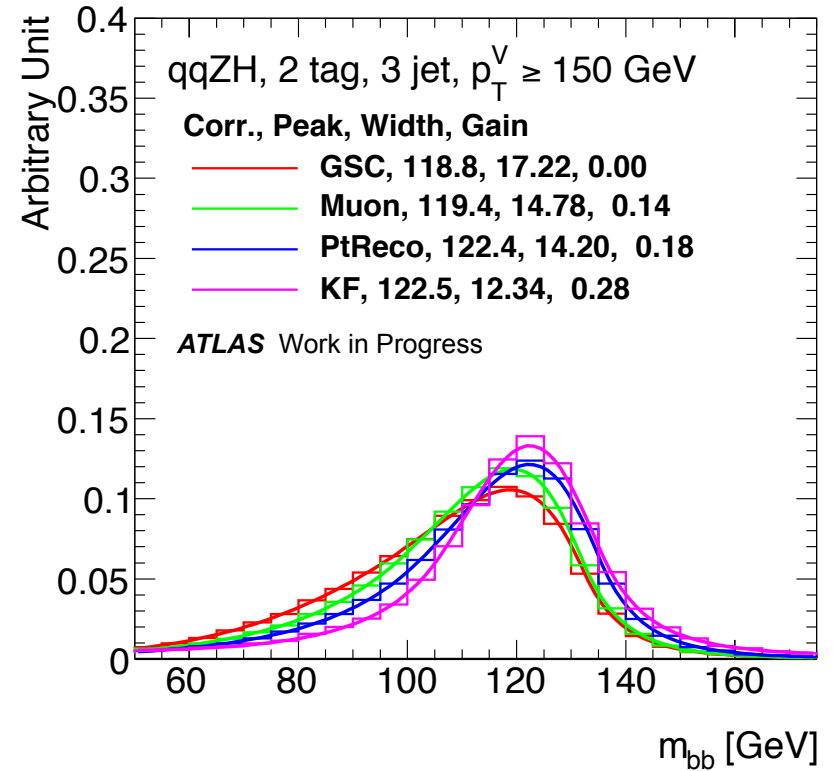
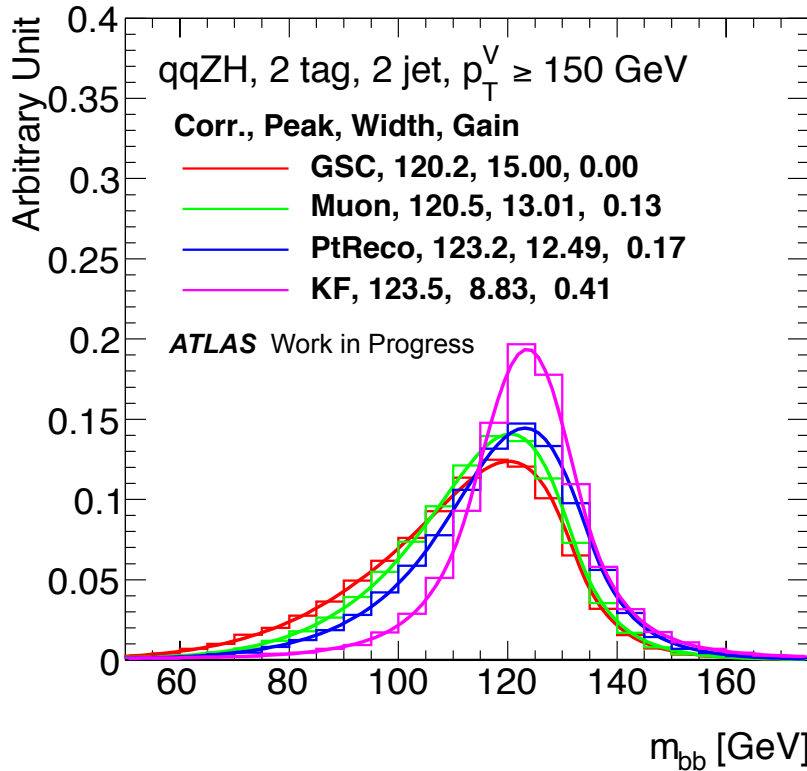
# $b$ -jet エネルギー補正 (Kinematic Fit)

- Jet のエネルギー分解能は 10% 程度, lepton は 1% 程度である
- $llbb$  の  $p_T$  バランスを利用して  $b$ -jet のエネルギーを補正できる



$$\begin{aligned}
 -2 \ln L = & \quad \leftarrow \text{Likelihood を最大化して fit 値を得る} \\
 & + \frac{\left( p_X^{Zh}(l_1^{fit}, l_2^{fit}, b_1^{fit}, b_2^{fit}) \right)^2}{\sigma_{p_X^{Zh}}^2} \quad \leftarrow p_X^{ZH}, p_Y^{ZH}: \text{バランスの要求 } (\sigma = 9 \text{ GeV}) \\
 & + \frac{\left( p_Y^{Zh}(l_1^{fit}, l_2^{fit}, b_1^{fit}, b_2^{fit}) \right)^2}{\sigma_{p_Y^{Zh}}^2} \quad \leftarrow m_{ll}: Z \text{ の Breit-Wigner} \\
 & + 2 \ln \left\{ \left( m_{ll}^2(l_1^{fit}, l_2^{fit}) - m_Z^2 \right)^2 + m_Z^2 \Gamma_Z^2 \right\} \quad \leftarrow E^e, p_T^\mu, (E^j)^3: \text{分解能の範囲で fit する} \\
 & + \sum_{i=l_1, l_2} \frac{\left( E_i^{obs} - E_i^{fit} \right)^2}{\sigma_{E_i}^2} \quad \leftarrow p_T^b: \text{Transfer Functions } (p_T \text{ 応答の確率分布}) \\
 & - 2 \ln L(b_1^{obs}, b_1^{fit}) - 2 \ln L(b_2^{obs}, b_2^{fit})
 \end{aligned}$$

# $b$ -jet エネルギー補正 (結果)

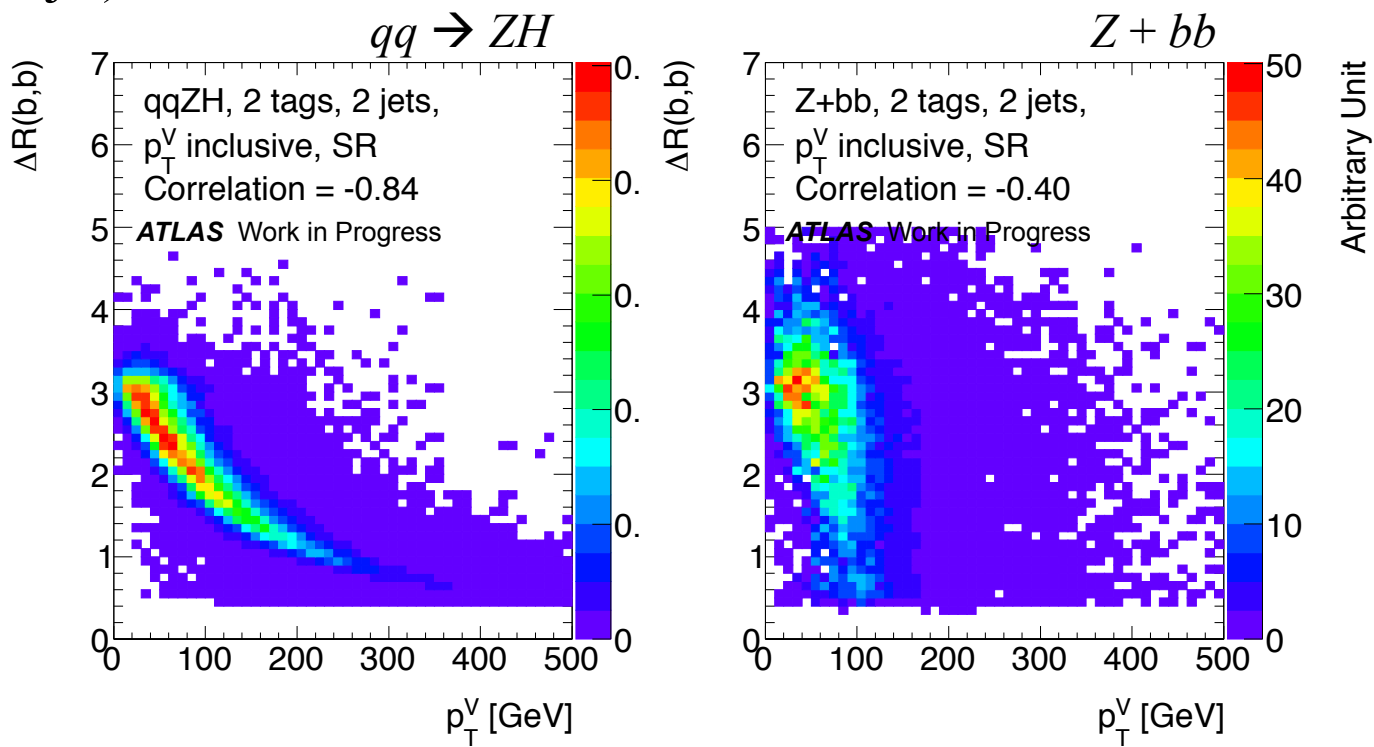


- Muon 補正:  $m_{bb}$  分解能を約 13% 改善した
- PtReco 補正:  $m_{bb}$  分解能を約 17% 改善した
- Kinematic Fit: 最も感度の良い 2 tag 2 jet  $p_T^V = 150$ – GeV 領域で  $m_{bb}$  分解能を約 40% 改善した

# 多変量解析

- 信号と背景事象では変数やその相関が微妙に異なる
- Boosted Decision Tree (BDT) を用いて分離変数 ( $BDT_{VH}$ ) をつくり, 信号と背景事象を効率的に分離できる
- 変数 2 jet ( $\geq 3$  jet)

- $m_{bb}$
- $\Delta R(b,b)$
- $d\phi(V,bb)$
- $d\eta(V,bb)$
- $p_T^V$
- $p_T^{b1}$
- $p_T^{b2}$
- $E_T^{\text{miss}}$
- $m_{ll}$
- $(p_T^{j3})$
- $(m_{bbj})$



- カット解析に比べて約 20% 感度を改善した

# 系統誤差

- 実験系統誤差は最終的に 61 個の Nuisance Parameters (NP) にまとめるが, 本解析に影響の大きいものは以下である
  - $b$ -tag 効率: 2, 10, 30% for  $b, c$ , light-jet
  - jet energy scale: 4.5% at  $p_T = 20$  GeV, 1% at 200 GeV, 2% at 2 TeV
- シミュレーションの誤差は generator や renormalization scale, factorization scale, parton shower を変えて以下のように見積もった

	Normalization	Acceptance	Shape
$qq \rightarrow ZH$	~1.6%	~14%	$m_{bb}, p_T^V$
$gg \rightarrow ZH$	~27%	~14%	$m_{bb}, p_T^V$
diboson	~20%	~18%	$m_{bb}, p_T^V$
single-top	~6.2%	~41%	$m_{bb}, p_T^V$
$Z+(bb, bc, bl, cc)$	Float	2 jet, $\geq 3$ jet	$m_{bb}, p_T^V$
$tt$	Float	2 jet, $\geq 3$ jet	$m_{bb}, p_T^V$

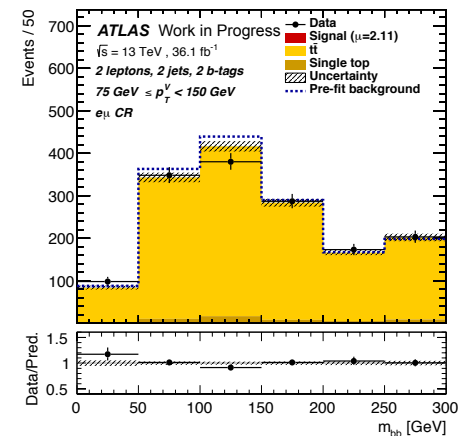
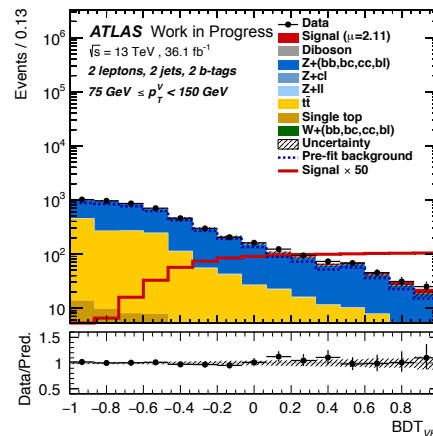
# 統計解析

- Maximum likelihood fit を行い  $Z$ +jets と  $tt$  を見積もり, 背景事象のみの仮定を検定し, 信号強度 ( $\mu$ ) を求める
- Likelihood は  $BDT_{VH}$  もしくは  $m_{bb}$  の bin ごとの Poisson 確率の積として記述され, 系統誤差は  $NP(\theta)$  として正規分布もしくは対数正規分布で記述される

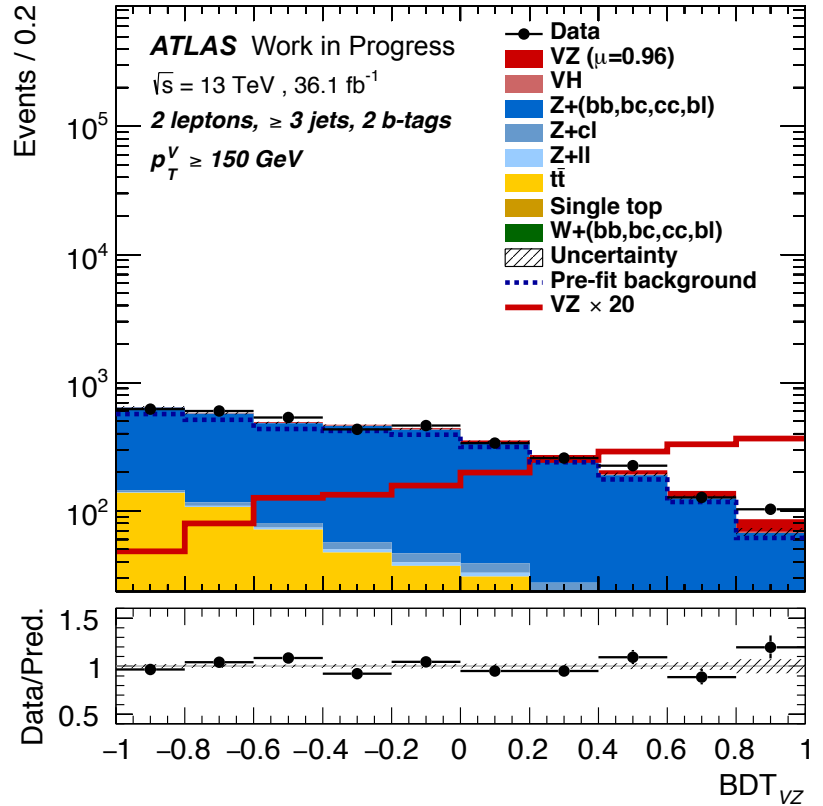
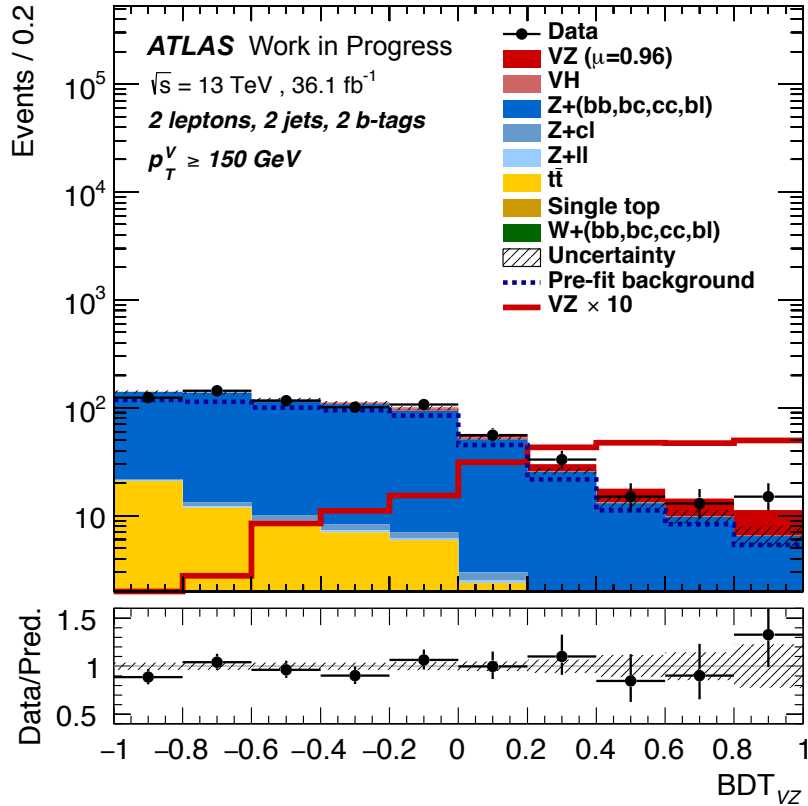
$$L(\mu, \theta) = \prod_{i \in bins} P(n_i | \mu s_i(\theta) + b_i(\theta)) \prod_{j \in \theta} G(\theta_j)$$

- $Z$ +jets と  $tt$  の floating normalization は,  $m_{bb}$  sideband (low- $BDT_{VH}$ ) と top CR のデータにより以下のように制限した

- $Z$ +jets (2 jet):  $1.28 \pm 0.13$
- $Z$ +jets ( $\geq 3$  jet):  $1.15 \pm 0.10$
- $tt$  (2 jet):  $0.98 \pm 0.11$
- $tt$  ( $\geq 3$  jet):  $1.03 \pm 0.07$

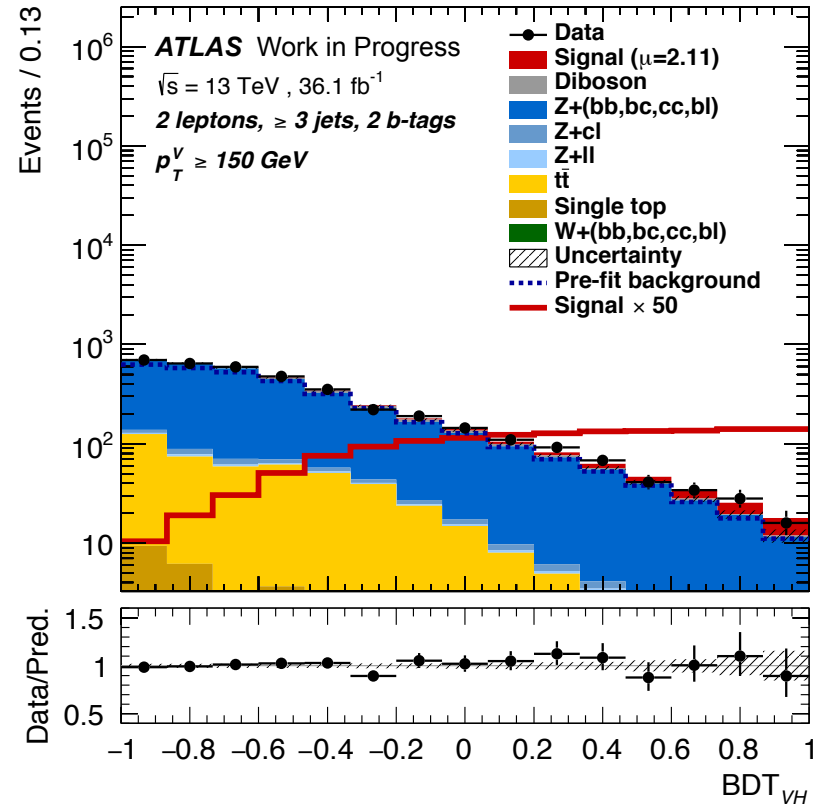
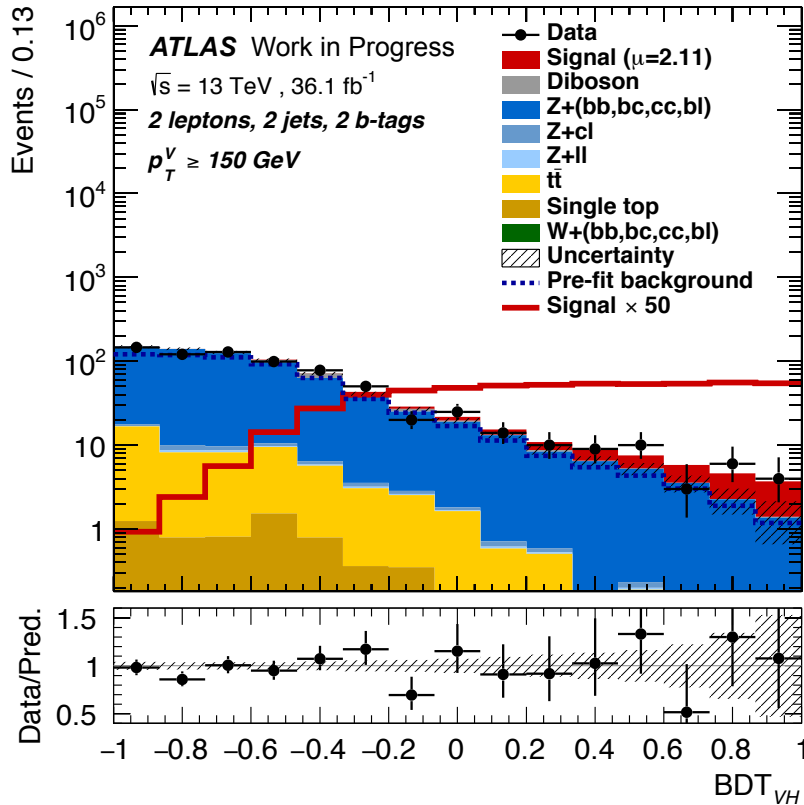


# VZ ( $Z \rightarrow bb$ ) を信号とみなした場合の確認



- Observed significance:  $3.5\sigma$
- Expected significance:  $3.5\sigma$
- $\mu = 0.96^{+0.19}_{-0.19}$  (stat.)  $^{+0.26}_{-0.22}$  (syst.)

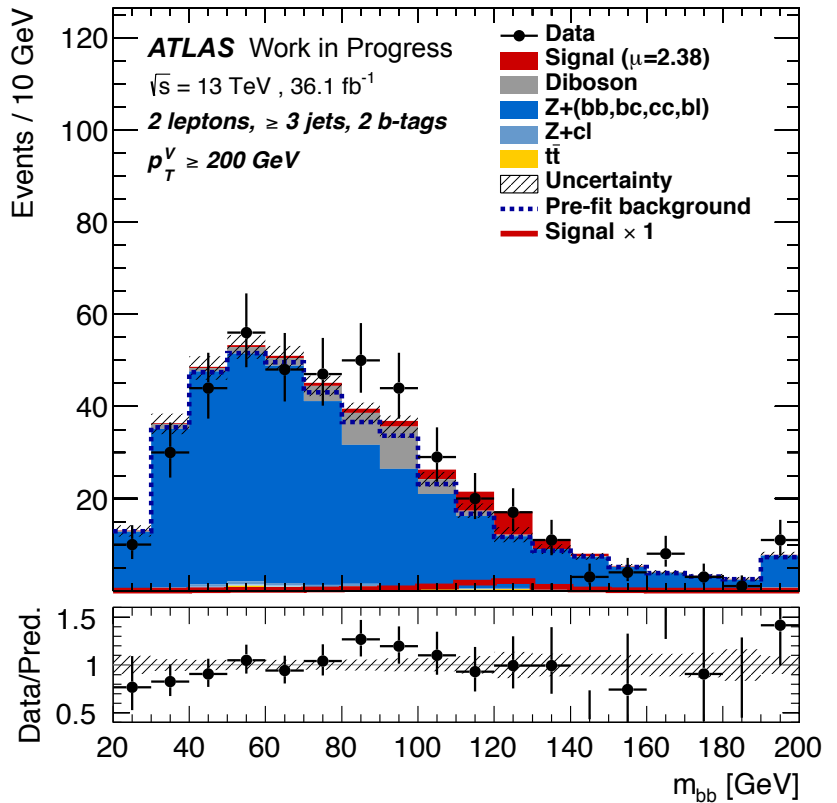
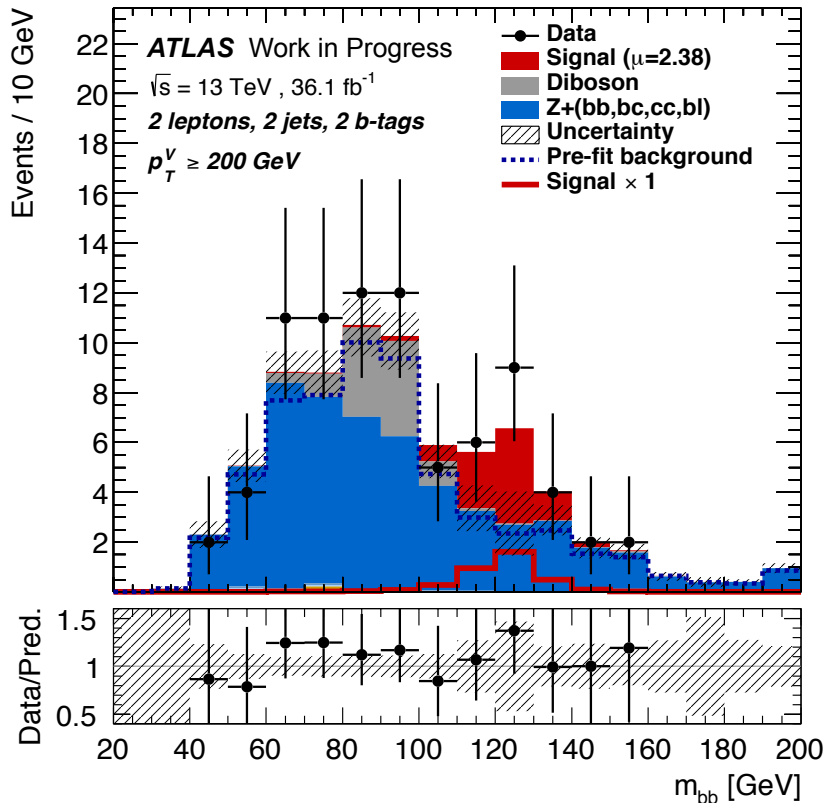
# Run2 2-lepton 多変量解析 (メイン) の結果



- Observed significance:  $3.6\sigma$
- Expected significance:  $1.9\sigma$
- $\mu = 2.11^{+0.50}_{-0.48}$  (stat.)  $^{+0.65}_{-0.47}$  (syst.)



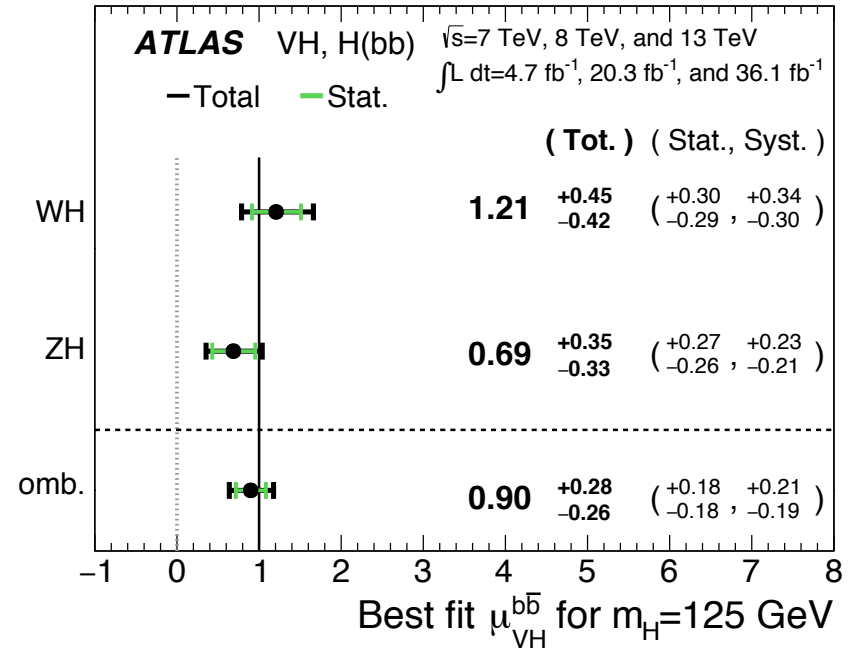
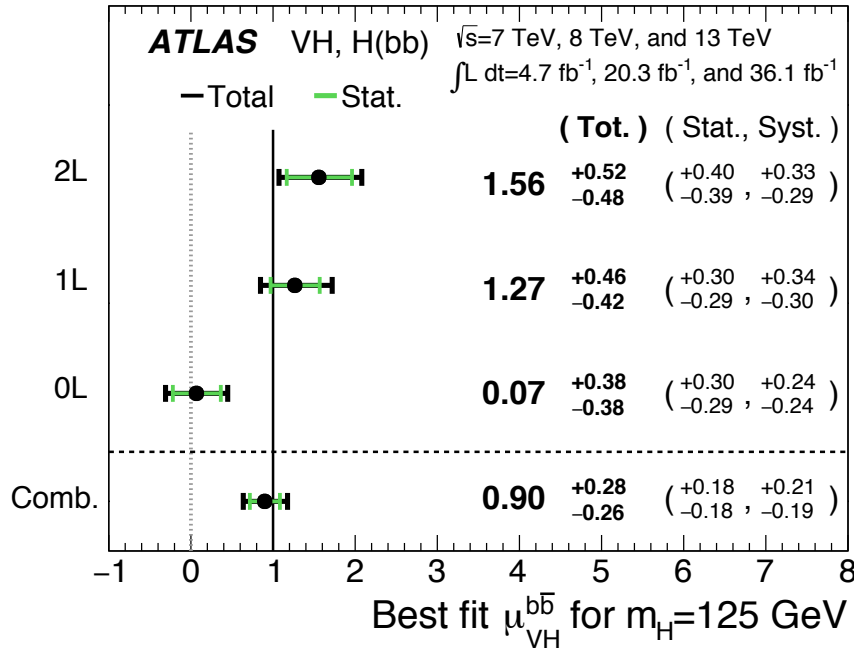
# Run2 2-lepton カット解析 (確認) の結果



- Observed significance:  $3.4\sigma$
- Expected significance:  $1.6\sigma$
- $\mu = 2.38^{+0.62}_{-0.59}$  (stat.)  $^{+0.75}_{-0.53}$  (syst.)

# Run1, Run2 combined 結果

arXiv:1708.03299



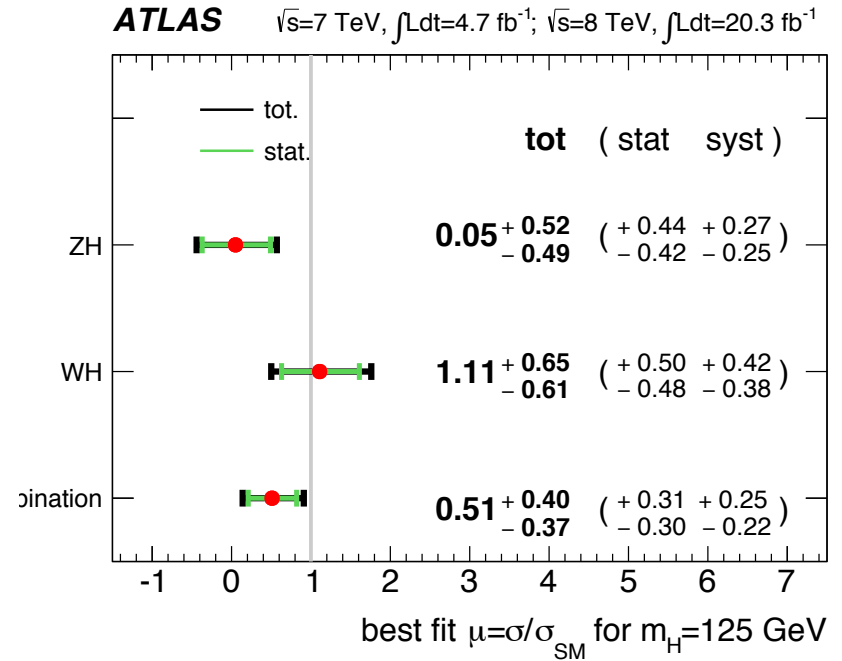
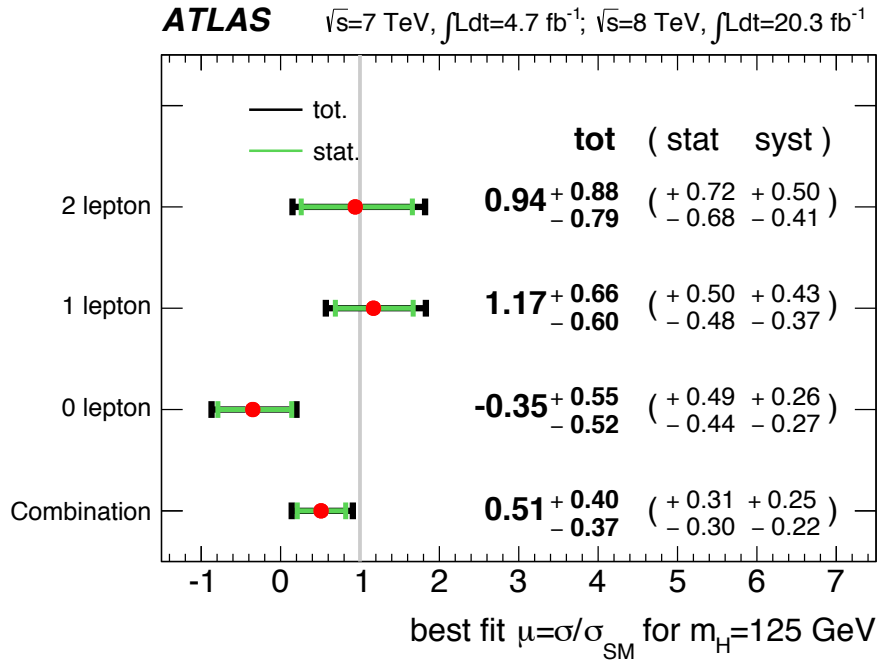
- 3 parameter of interest (POI) fit (左) and 2 POI fit (右)
- Observed significance:  $3.6\sigma$
- Expected significance:  $4.0\sigma$
- $\mu = 0.90$   $^{+0.18}_{-0.18}$  (stat.)  $^{+0.21}_{-0.19}$  (syst.)

# Summary

- Run1 で未発見であった  $H \rightarrow bb$  を探索した
  - Run2 に向けて TGC の壊れたチェンバーや読み出し装置を交換し, 約 90% のトリガー効率を実現した
  - $b$ -jet エネルギー補正を研究し  $m_{bb}$  分解能を最大約 40% 改善した
- Run2 2-lepton channel 結果
  - Observed significance:  $3.6\sigma$
  - Expected significance:  $1.9\sigma$
  - $\mu = 2.11^{+0.50}_{-0.48}$  (stat.)  $^{+0.65}_{-0.47}$  (syst.)
- Run1, Run2 combined 結果
  - Observed significance:  $3.6\sigma$
  - Expected significance:  $4.0\sigma$
  - $\mu = 0.90^{+0.18}_{-0.18}$  (stat.)  $^{+0.21}_{-0.19}$  (syst.)

# Backup

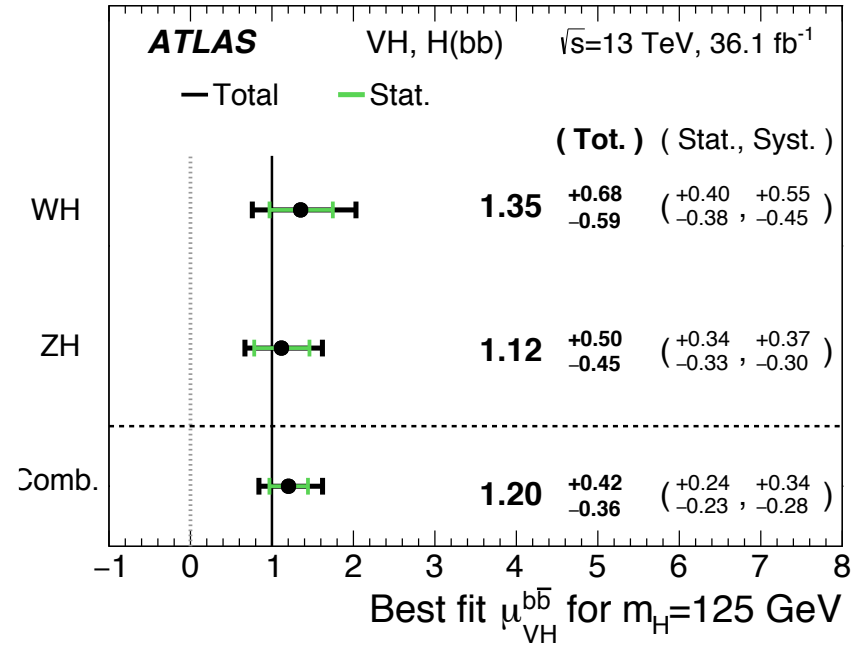
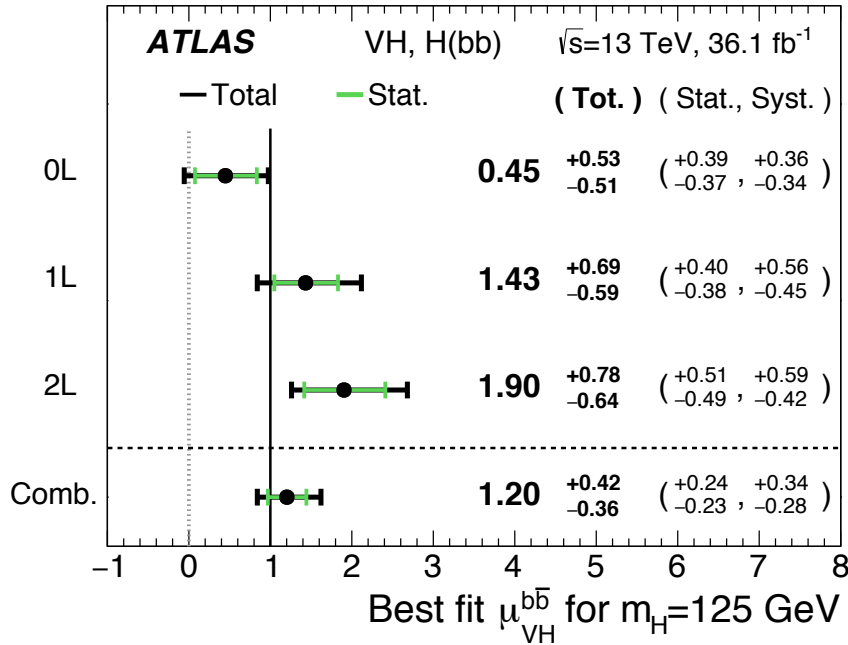
# Run1 combined 結果



- 3 parameter of interest (POI) fit (左) and 2 POI fit (右)
- Observed significance:  $1.4\sigma$
- Expected significance:  $2.6\sigma$
- $\mu = 0.51^{+0.31}_{-0.30}$  (stat.)  $^{+0.22}_{-0.25}$  (syst.)

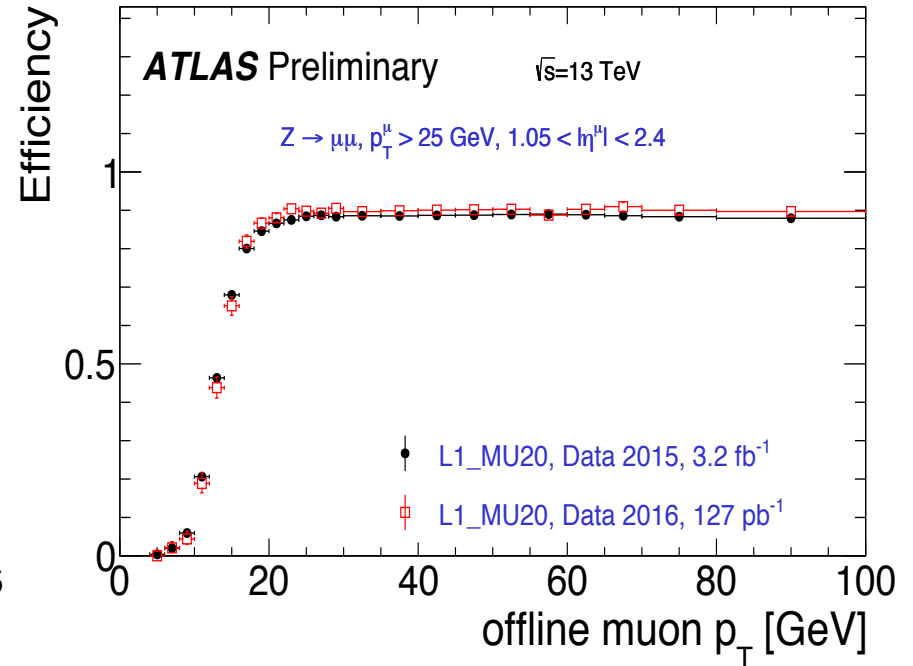
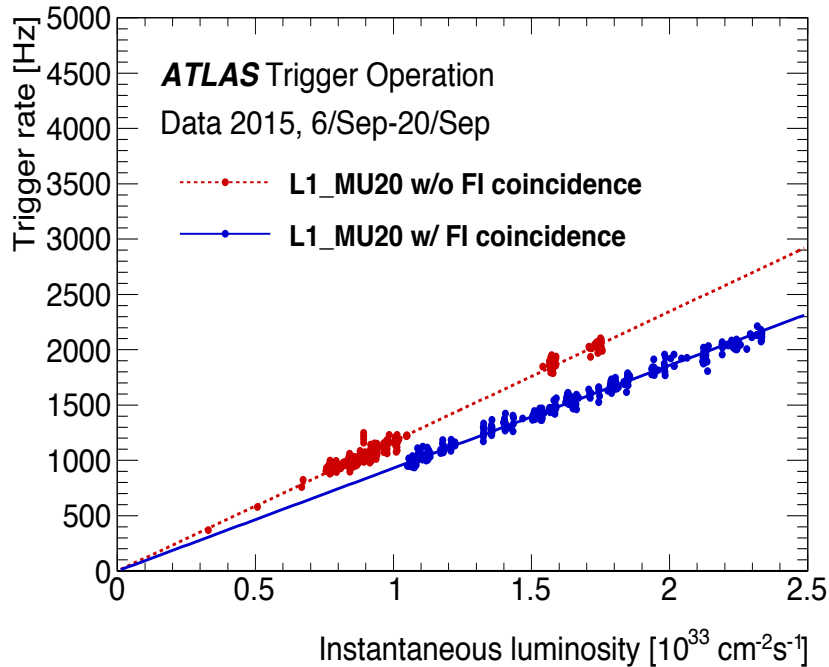
# Run2 combined 結果

arXiv:1708.03299



- 3 parameter of interest (POI) fit (左) and 2 POI fit (右)
- Observed significance:  $3.5\sigma$
- Expected significance:  $3.0\sigma$
- $\mu = 1.20^{+0.24}_{-0.23}$  (stat.)  $^{+0.34}_{-0.28}$  (syst.)

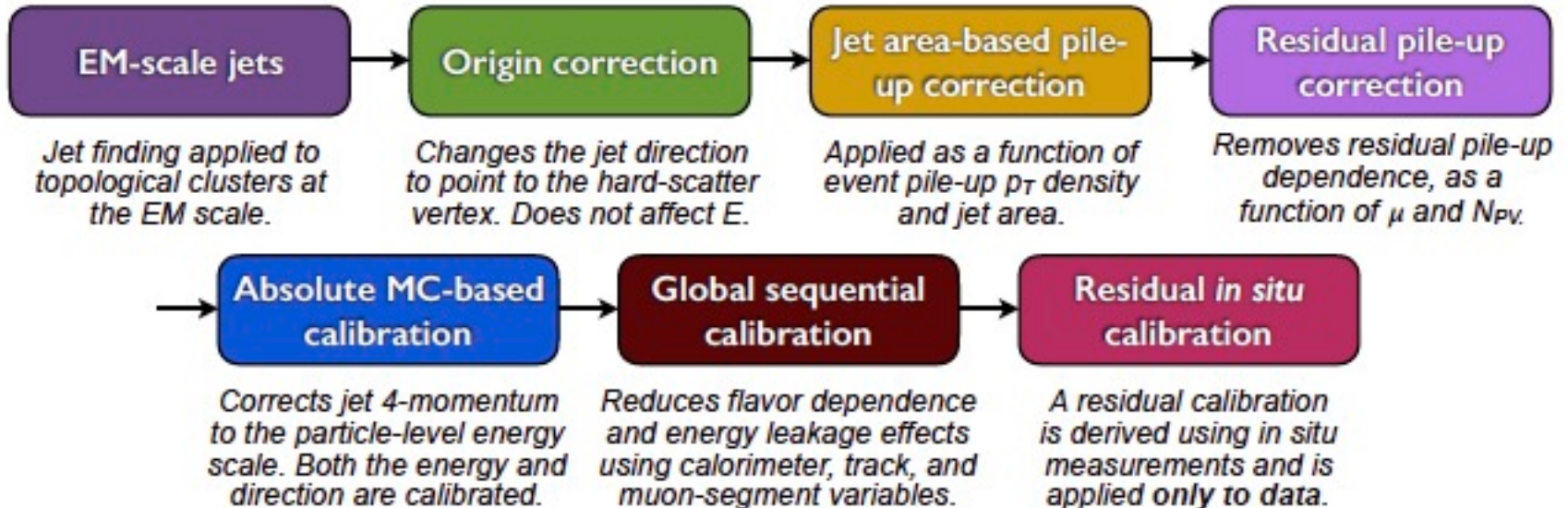
# Run2 初期の TGC の性能



- <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1MuonTriggerPublicResults>
- <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/MuonTriggerPublicResults>

# 標準的な jet エネルギー較正 (GSC)

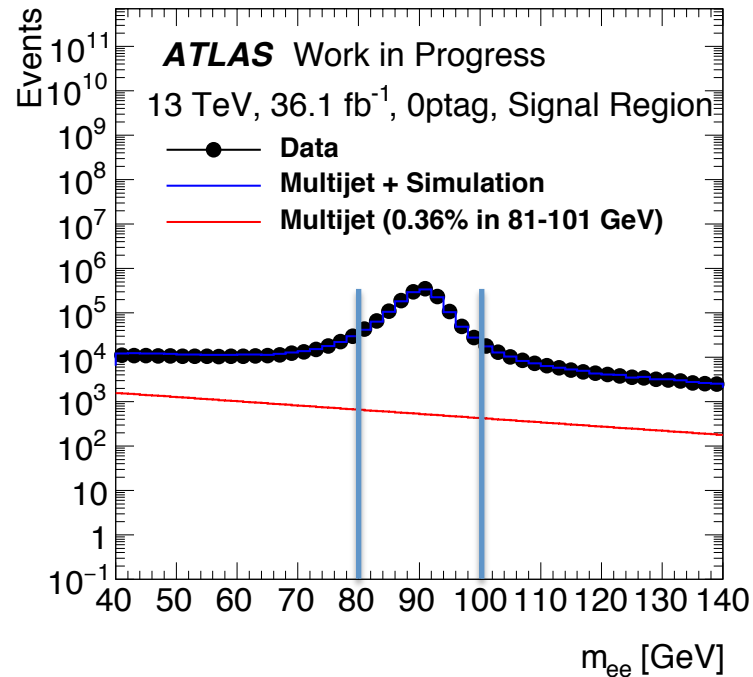
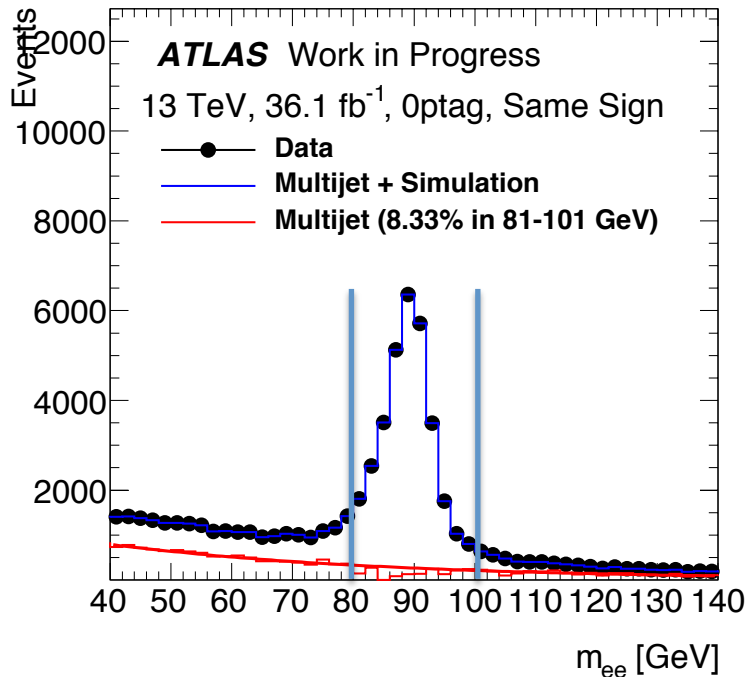
arXiv:1703.09665



- EM scale: 電子ビームや  $^{137}\text{Cs}$  の光子を用いて較正する
- Pile-up 補正: ジェット領域の大きさ,  $\mu$ ,  $N_{pV}$  に応じて補正する
- MC-based calibration: ハドロンシャワーは電子や光子に比べて可視化されるエネルギーが小さいため MC を用いて補正する
- GSC: 5 つの jet 変数を順番に用いてエネルギー分解能を改善する
  - Tile 1 層目の比率 ( $f_{\text{Tile0}}$ ), LAr 3 層目の比率 ( $f_{\text{LAr3}}$ ), track の数 ( $n_{\text{trk}}$ ), track の広がり ( $W_{\text{trk}}$ ), ミューオンセグメントの数 ( $n_{\text{segments}}$ )



# Multi-jet background



- $e$  は電荷を間違えやすいので  $\mu\mu$  と  $e\mu$  のみ反対電荷を要求している
- Same Sign region (左) を用いて SR (右) の multi-jet fake を見積もった
  - Multi-jet は SR では全背景の 1% 以下である
  - Multi-jet の  $m_{bb}$  と  $p_T^V$  の分布は  $t\bar{t}$  などの背景事象と近い
- 2-lepton では multi-jet は negligible である

# Event selection and breakdown

	Multivariate analysis	Cut-based analysis
Trigger	Single lepton	Single lepton
Leptons	2 VHLoose, $\geq 1$ VHSIGNAL	2 VHLoose $\geq 1$ VHSIGNAL
$E_T^{\text{miss}}$		$E_T^{\text{miss}}/\sqrt{S_T} < 3.5$
$m_{\ell\ell}$	81–101 GeV	81–101 GeV
Jets	2 jets $\geq 3$ jets	2 jets $\geq 3$ jets
Jet $p_T$	$> 20$ GeV	$> 20$ GeV
$b$ -jets	Exactly 2 $b$ -jets	Exactly 2 $b$ -jets
Leading $b$ -jet $p_T$	$> 45$ GeV	$> 45$ GeV
$p_T^V, \Delta R(b, b)$	75–150 GeV 150– GeV	75–150 GeV, $< 3.0$ 150–200 GeV, $< 1.8$ 200– GeV, $< 1.2$
SR	$ee$ $\mu\mu$ , opposite charge	$ee$ $\mu\mu$ , opposite charge
CR	$e\mu$ , opposite charge	$e\mu$ , opposite charge

NP category	Impact on the signal strength
Total	$\pm 0.74$
Stat.	$\pm 0.49$
Syst.	$\pm 0.56$
$b$ -tag	$\pm 0.19$
Jet and MET	$\pm 0.15$
Luminosity	$\pm 0.07$
Lepton	$\pm 0.03$
Signal	$\pm 0.38$
$Z$ +jets	$\pm 0.18$
MC stat	$\pm 0.17$
$t\bar{t}$	$\pm 0.13$
Diboson	$\pm 0.05$
Single-top	$\pm 0.03$

# Extrapolation

