



# ATLAS実験における ボソン対共鳴探索の最新結果

野辺拓也 (ICEPP)

2018年2月21日

24th ICEPP  
Symposium



東京大学  
素粒子物理国際研究センター  
International Center for Elementary Particle Physics  
The University of Tokyo

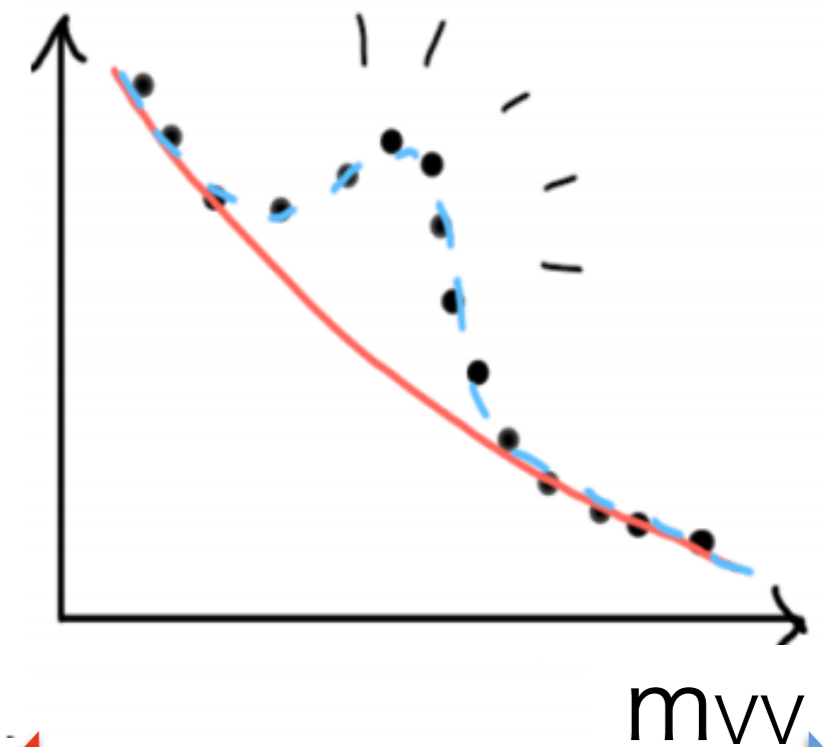
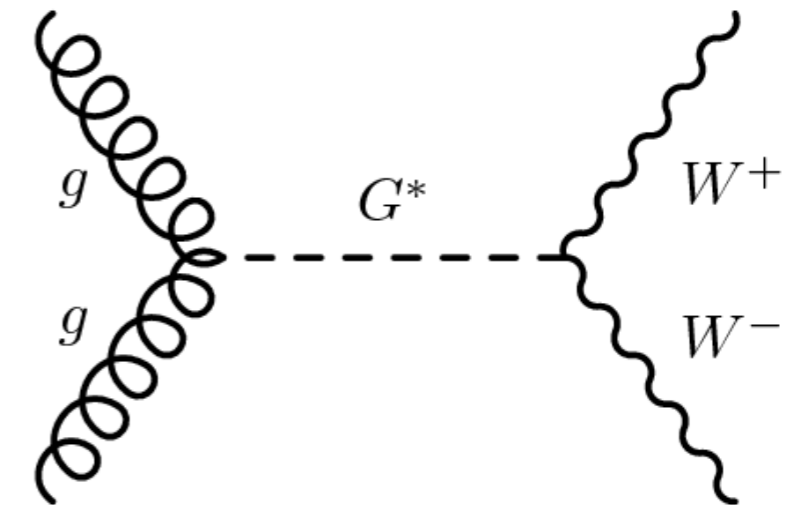
# 弱ボソン対共鳴

- $WW/WZ/ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ , 4-lepton,  $llqq$ ,  $lvqq$ ,  $\nu\nu qq$ ,  $qqqq$ , .....
- 各チャンネルで得意不得意がある

- **レプトンを含む終状態**：分岐比は小さいが背景事象も少ない

- **レプトンを含まない終状態**：分岐比は大きいですがQCDの背景事象が大きい

- 標準模型の背景事象を精度良く見積もり、それでは説明できない信号を探す



大きい 信号断面積 小さい

- **モデルに依らない探索が重要。色々なチャンネルで見る**

# VV共鳴の模型

- **2HDM** (hMSSMでlow  $\tan\beta$ を再調査)

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{leptons}/llqq$  @  $m_H \sim 300\text{GeV}$
- $A \rightarrow Zh \rightarrow llbb/vvbb$  @  $m_A \sim 300\text{GeV}$

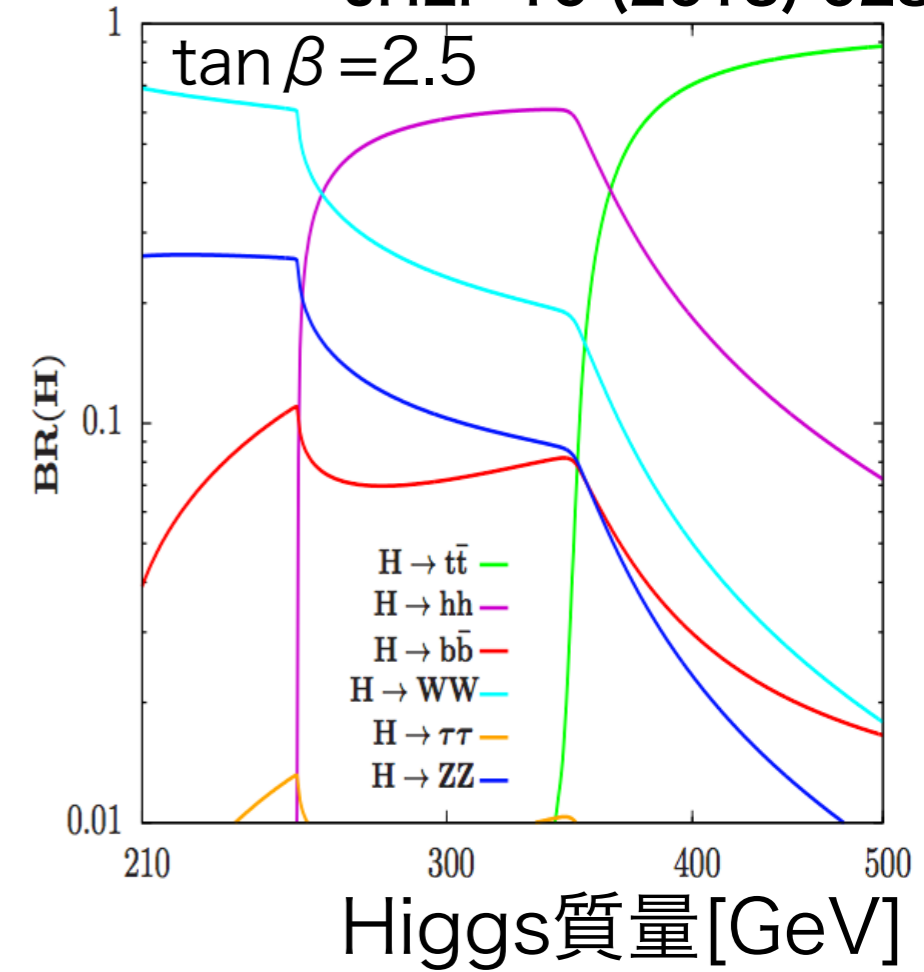
- 複合ヒッグス模型やGUTなどで登場する

拡張ゲージセクター： $W' \rightarrow WZ/Wh$ ,  $Z' \rightarrow WW/Zh$

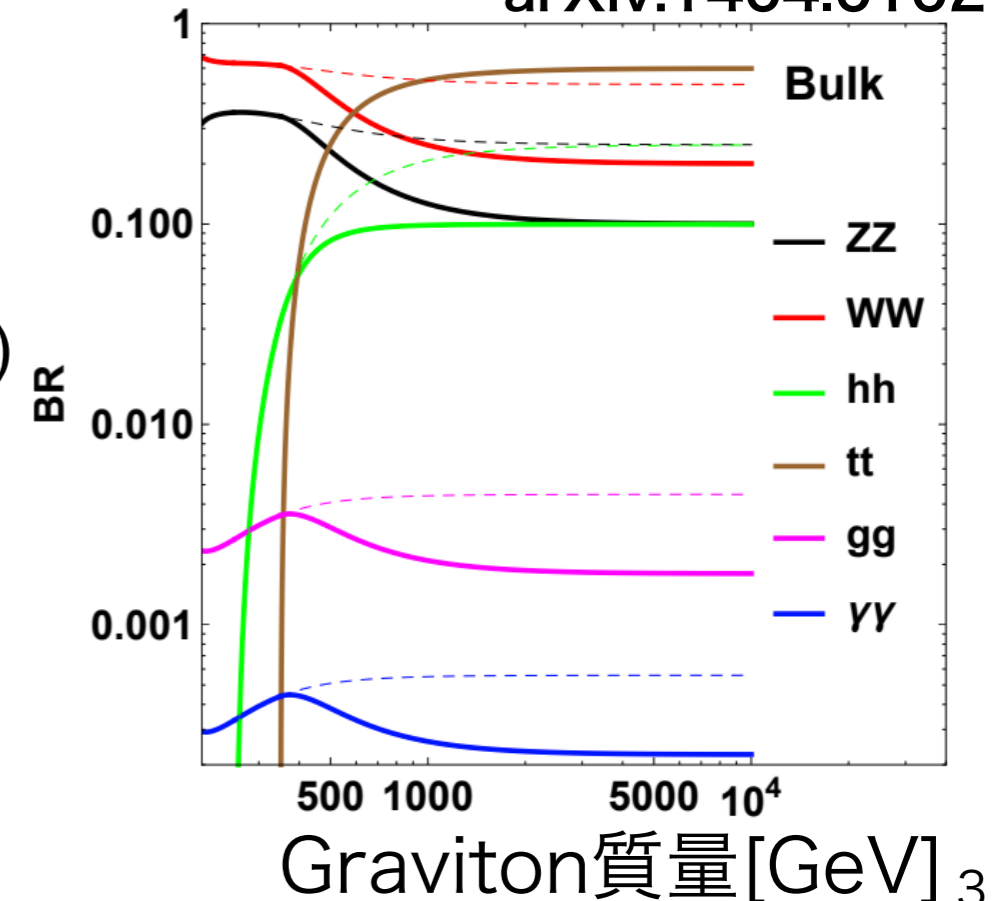
- KKグラビトン(RS模型)： $G_{KK} \rightarrow WW/ZZ/hh$

- Light-fermiophobicなモデル (いわゆるbulk RS模型)
- $>O(1)\text{TeV}$ の $WW/WZ/ZZ$ 共鳴  $\rightarrow llqq/vvqq/qqqq$

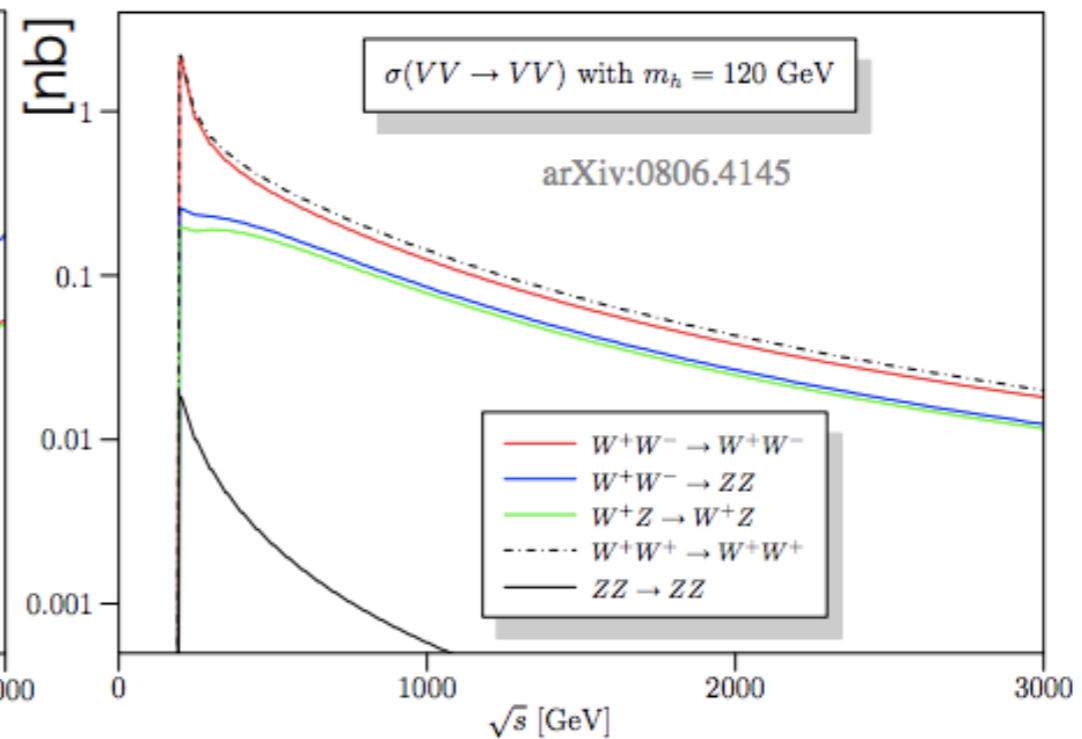
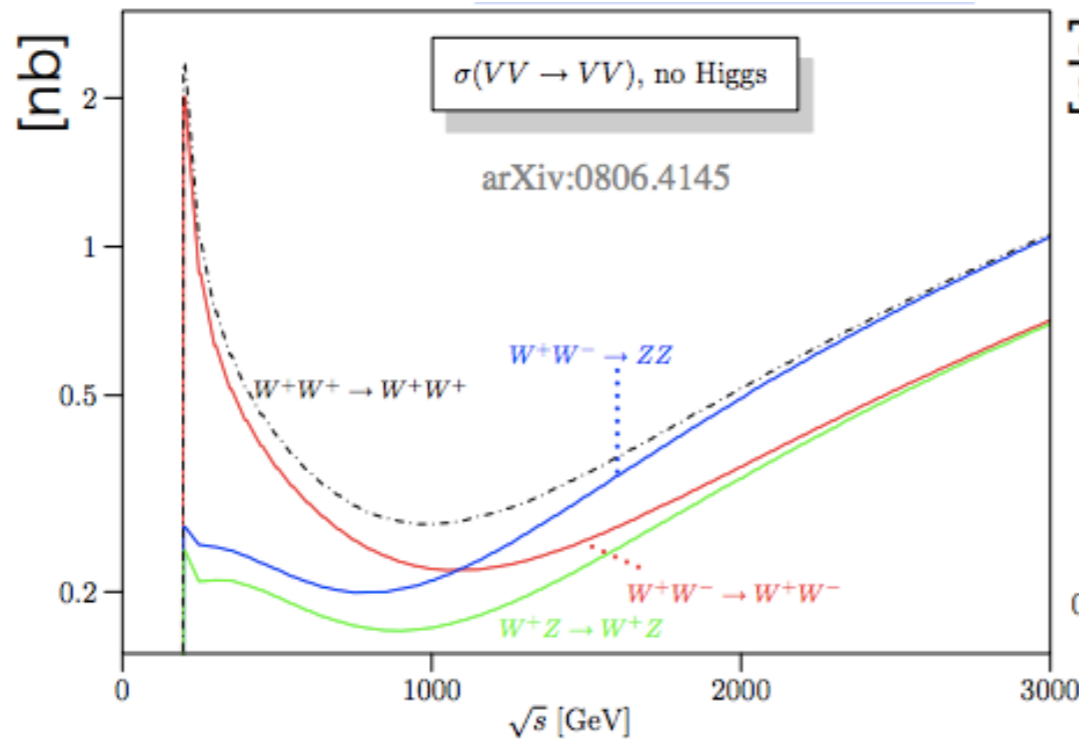
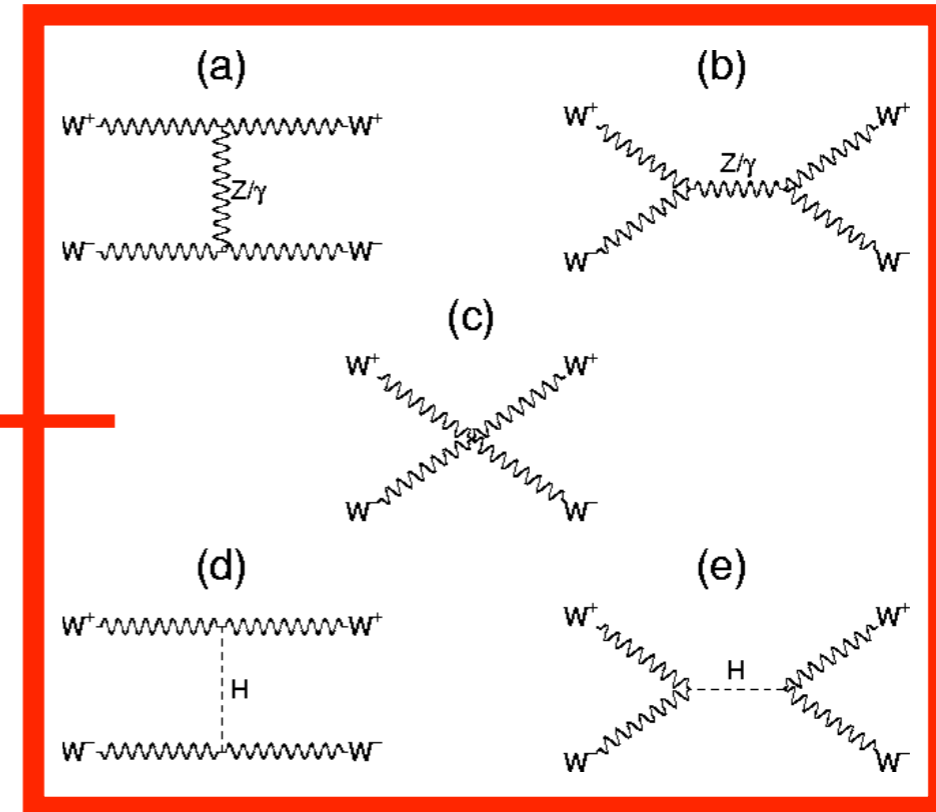
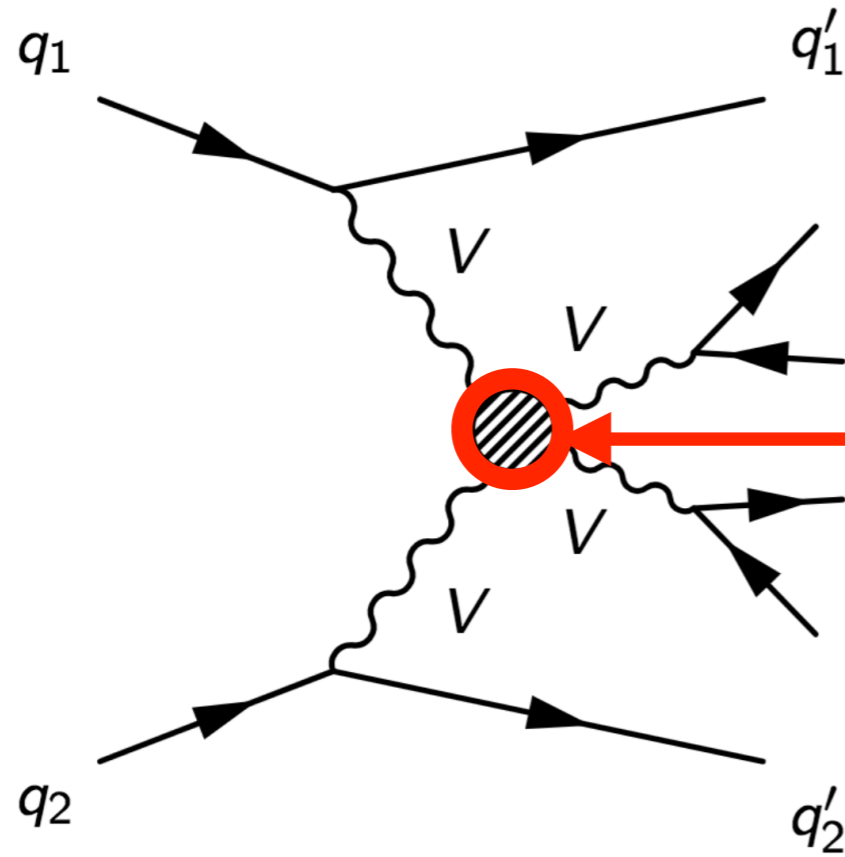
JHEP 10 (2013) 028



arXiv:1404.0102



# ヒッグス機構の検証から新物理へ

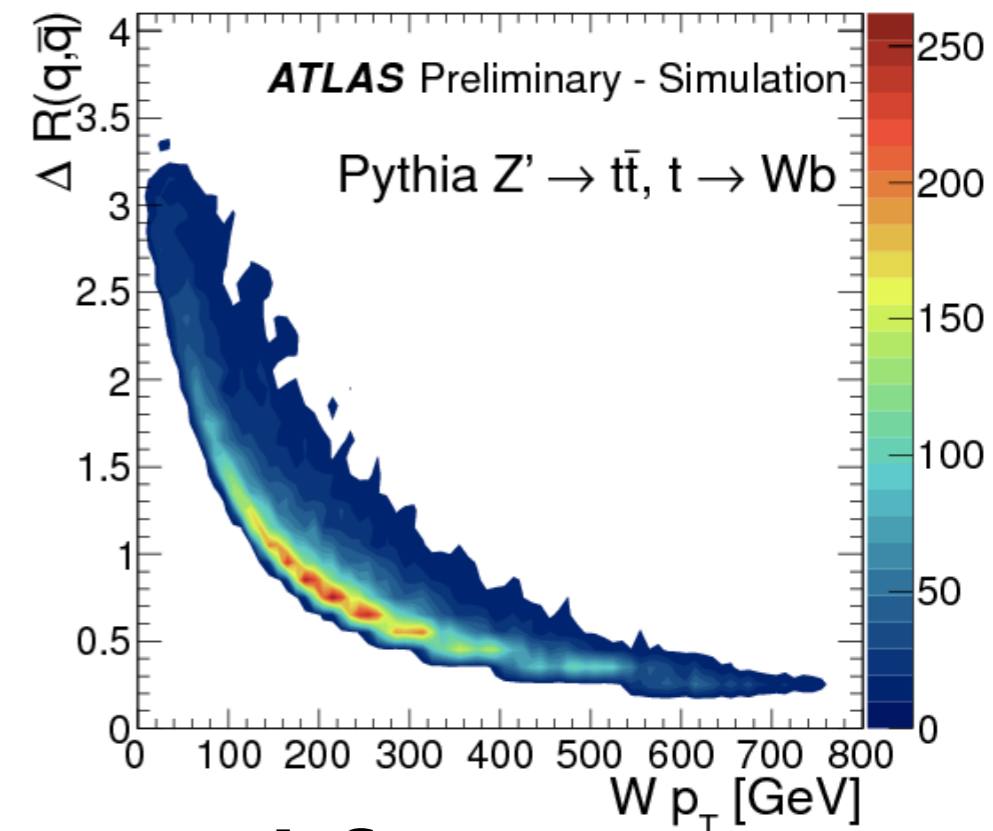


**High-mass (a few TeV)が重要**

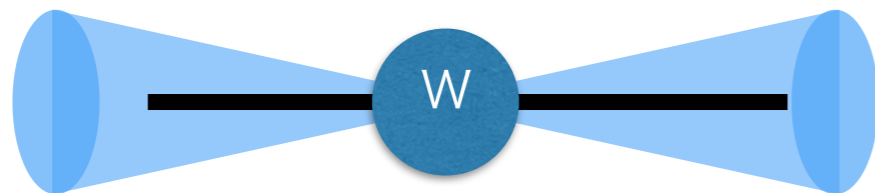


# High-momentum $W/Z \rightarrow qq$ の再構成

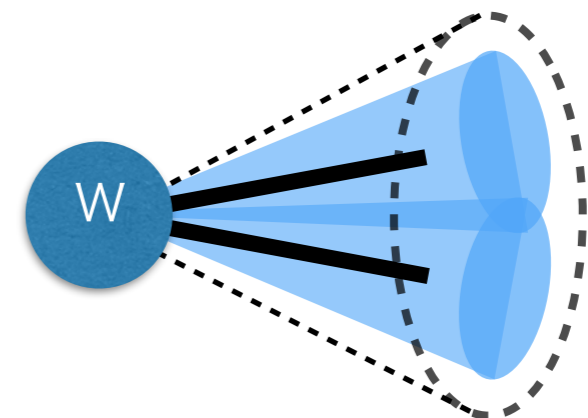
- 質量が非常に高い信号 (生成断面積: 小) に迫る  $\rightarrow$  ボソンのハドロン崩壊モードを用いる  
e.g.  $BR(ZZ \rightarrow qqqq) \sim 50\%$  v.s.  $BR(ZZ \rightarrow 4\text{lepton}) \sim 4\%$
- ボソンの崩壊で生じるクォーク間の距離:  $\Delta R(q,q) \sim 2M/p_T$ 
  - $p_T=300\text{GeV}$ のWボソン:  $\Delta R(q,q) \sim 0.5$   
 $\rightarrow$  通常のジェットアルゴリズム(anti-kT cone parameter  $R=0.4$ )では分離できない
  - 1本のジェット (**large-R jet**,  $R=1.0$ )として再構成
  - パイルアップからの寄与をうまく取り除く



## ボソンの静止系

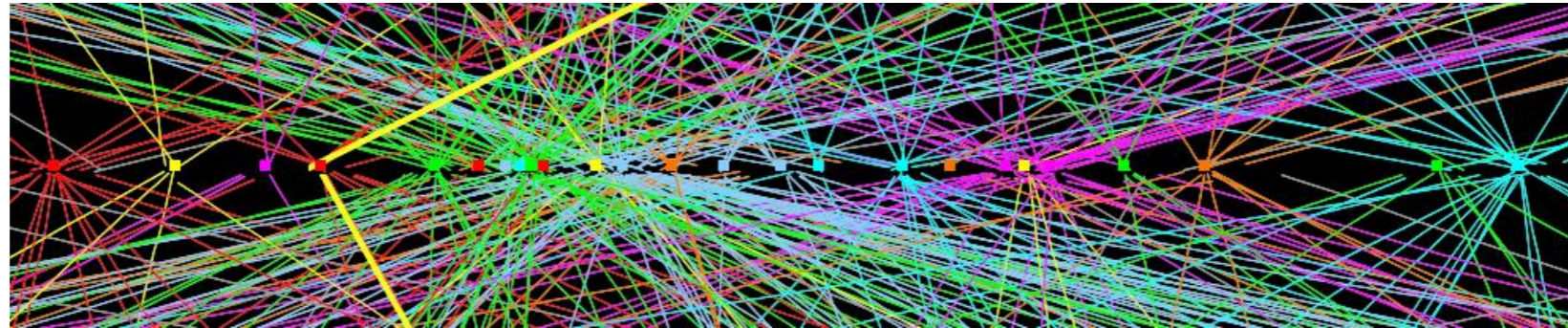


## Boosted frame



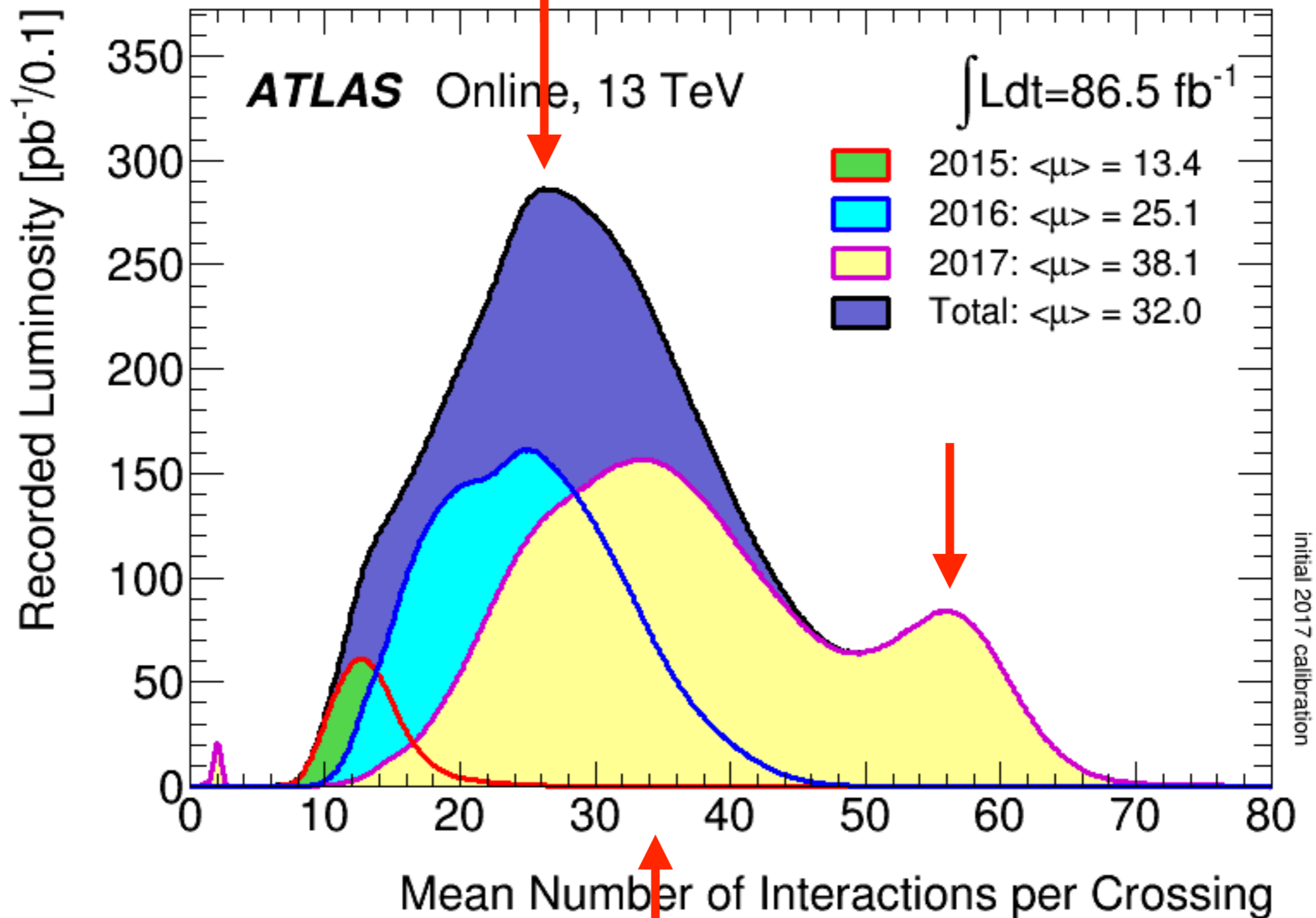
# 多重陽子散乱 (パイルアップ)

Z- $\rightarrow$  $\mu\mu$  candidate with 25 vtx



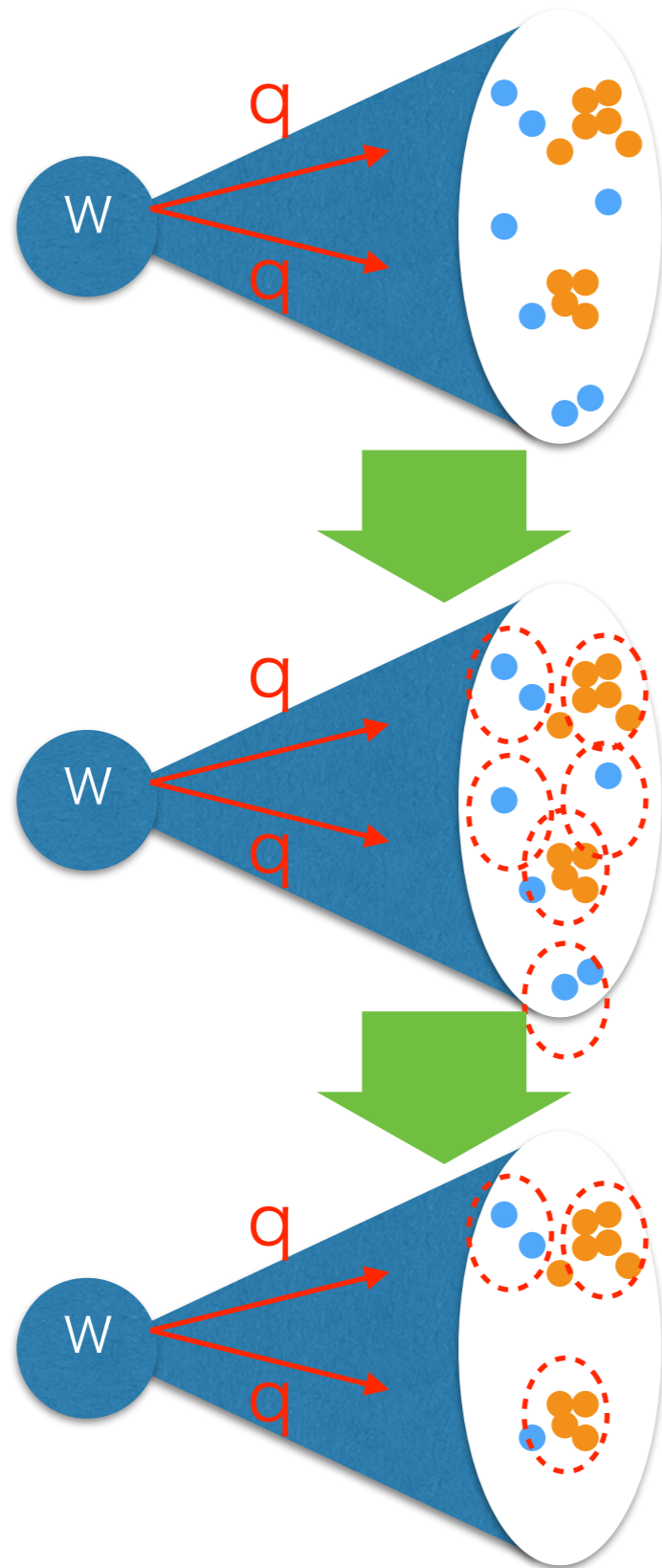
- 陽子陽子非弾性散乱の断面積は80mb
- LHCに入っているバンチ (陽子の塊) 数：約2000
- LHCのrevolution frequency： $c/27\text{km} \sim$  約11kHz
- 瞬間ルミノシティ =  $1.5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- 1回のバンチ同士の衝突で発生する事象数  
=  $(80\text{mb} \times 1.5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}) / (2000 \text{ bunches} \times 11\text{kHz}) \sim 55$ 個

2016年はたかだか30くらい

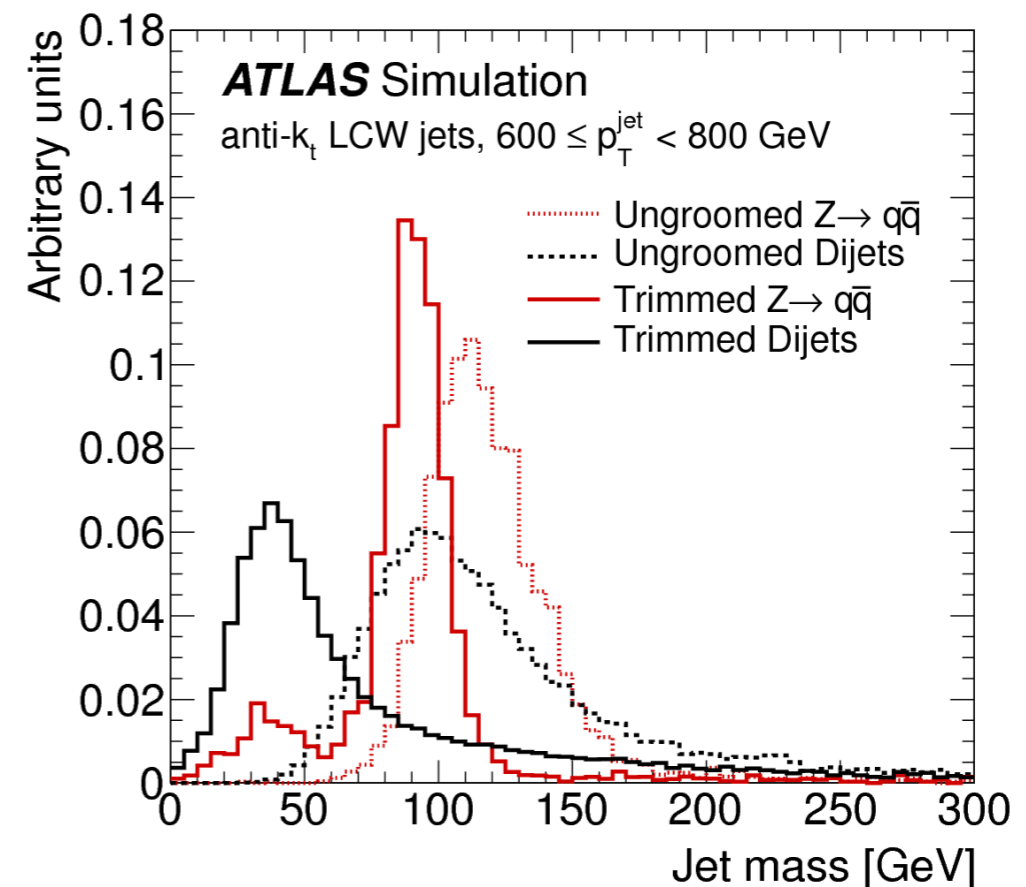


2017年前半は $L \sim 1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $N_{\text{bunch}} \sim 2800$

# Trimmingとジェット質量



- ジェットはカロリメーターで測定した「トポ・クラスター」から再構成する（パイルアップ由来のハドロンが重なっている）
- “Trimming”：ジェットの運動量に対して5%以下の運動量を担うサブジェットは取り除く
- 各クラスターを質量0の素粒子と違って4-vector sumを取り「ジェット質量」を再構成

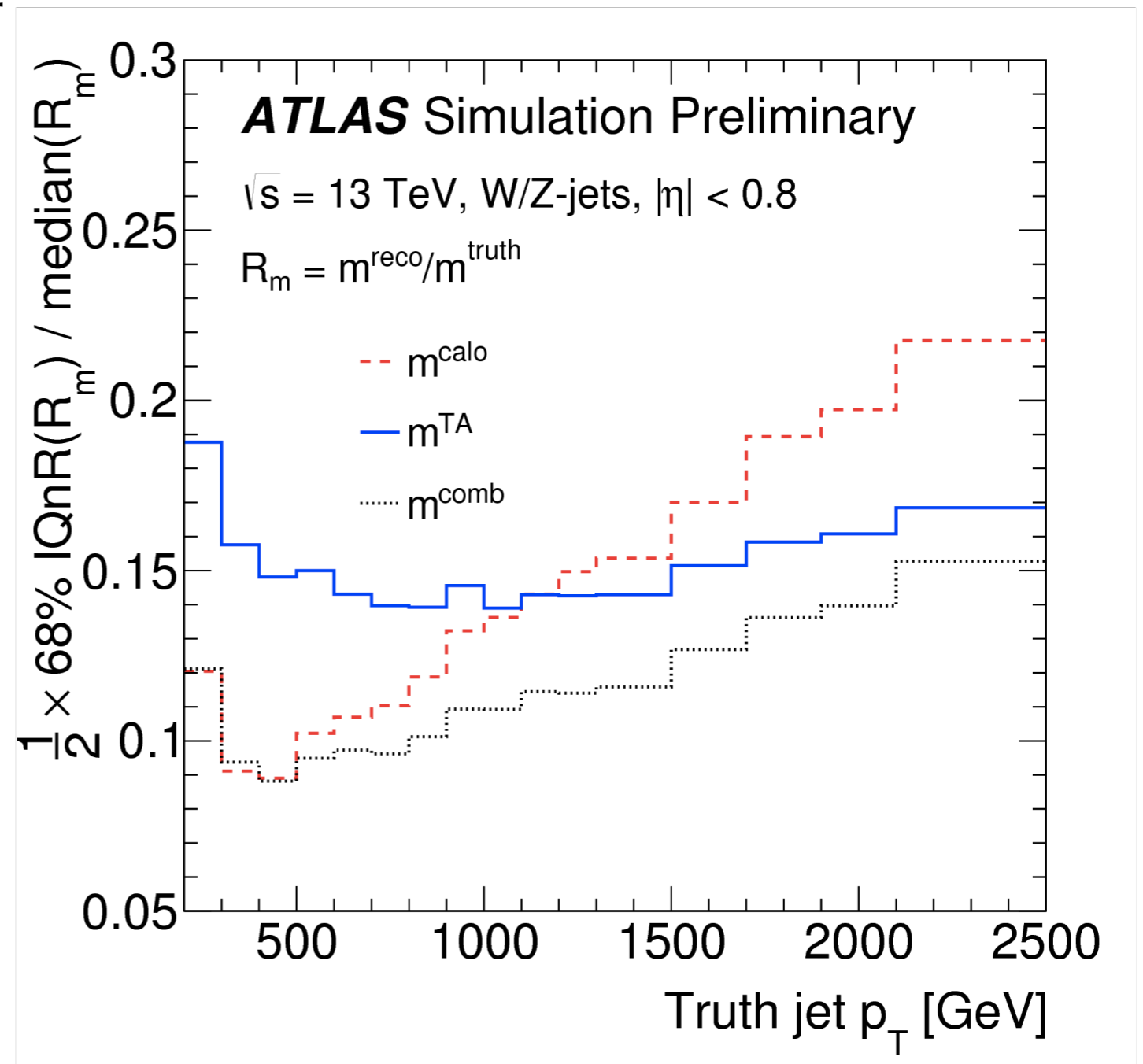


# ジェット質量の改善

- 高運動量では複数のハドロンがひとつのクラスターとして再構成されてしまう
- エネルギー分解能の良いカロリメータと角度分解能の良い飛跡検出器の信号を組み合わせる事で質量分解能向上

$$m_{TA} = m_{\text{trk}} \frac{p_{T,\text{calo}}}{p_{T,\text{trk}}}$$

( $m_{\text{trk}}$ : 荷電粒子の飛跡のみ  
用いて再構成した質量)

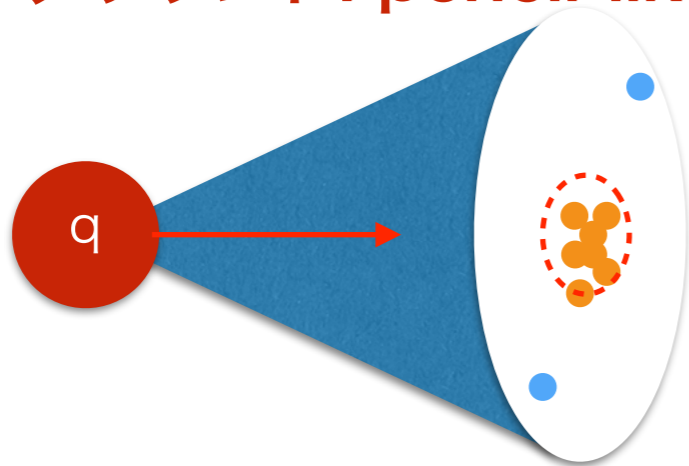




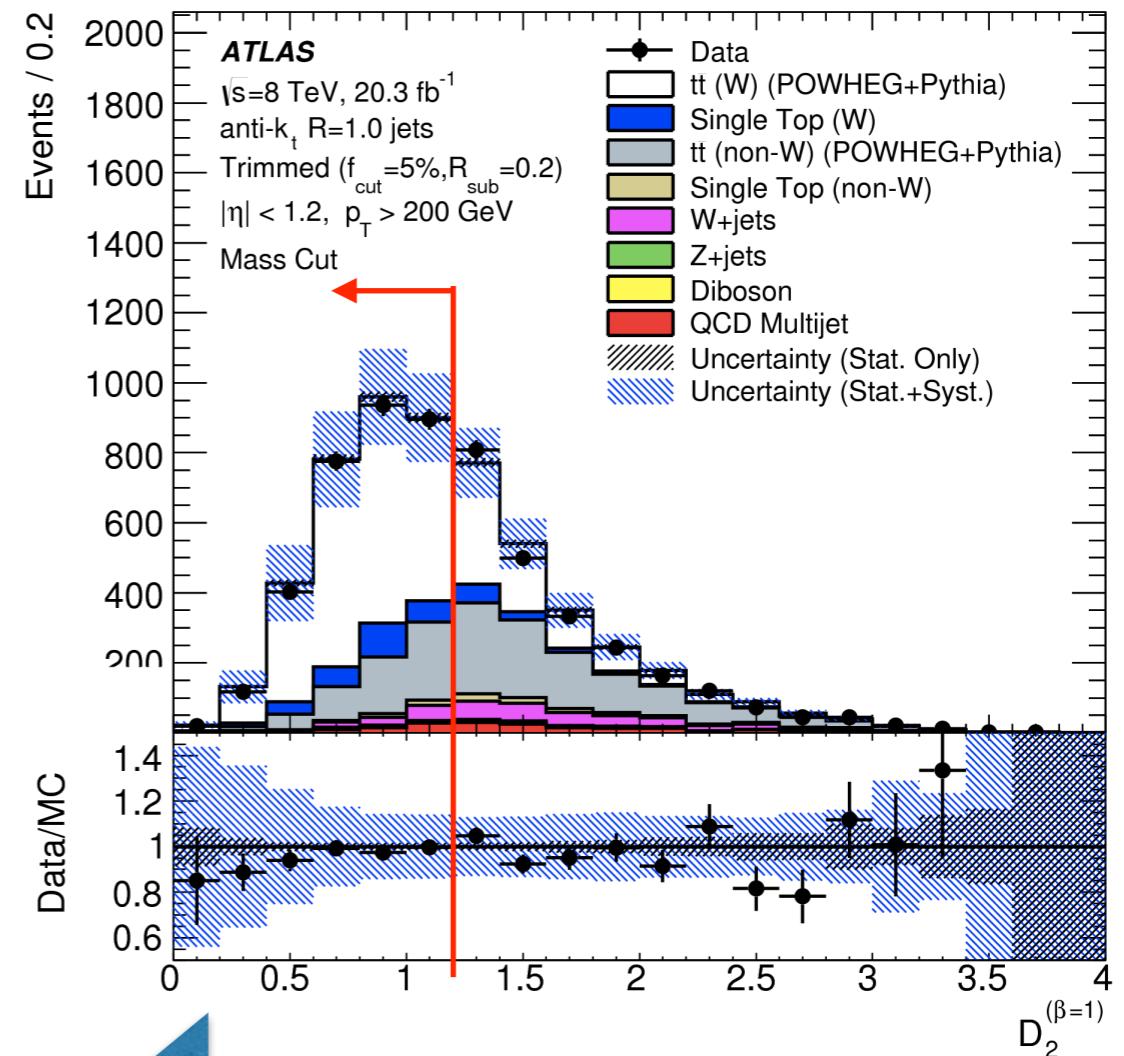
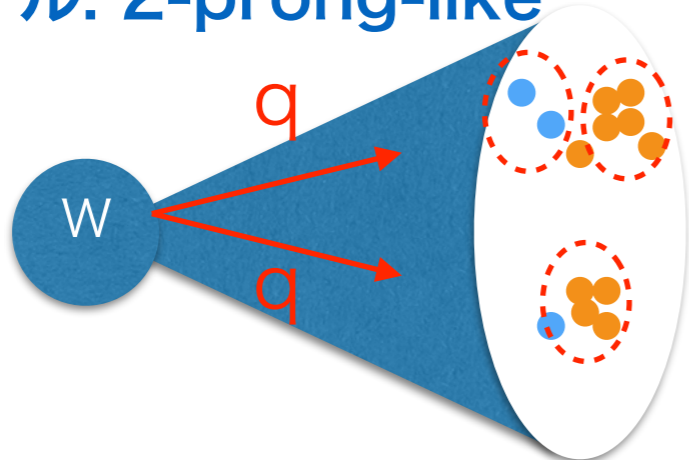
# Boosted W/Z tagging

- W/Z由来のジェットは内部の2ヶ所で局所的にエネルギーが観測される  
→パラメータ化 ( $D_2$ ) してカットに用いる (ボソンタグ)
- 質量カットと組み合わせて50% signal efficiency v.s. >90% background rejection

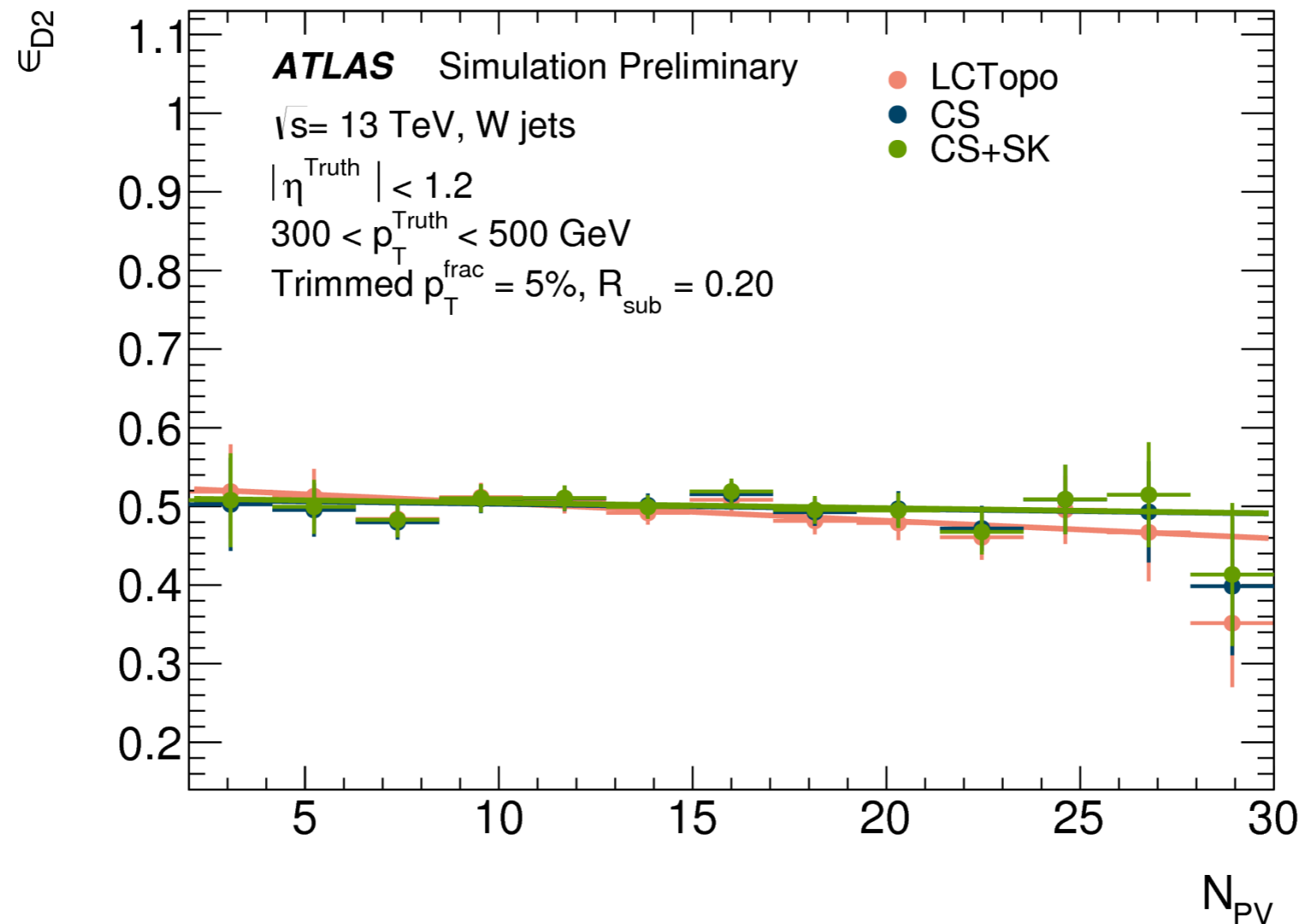
バックグラウンド: pencil-like



シグナル: 2-prong-like



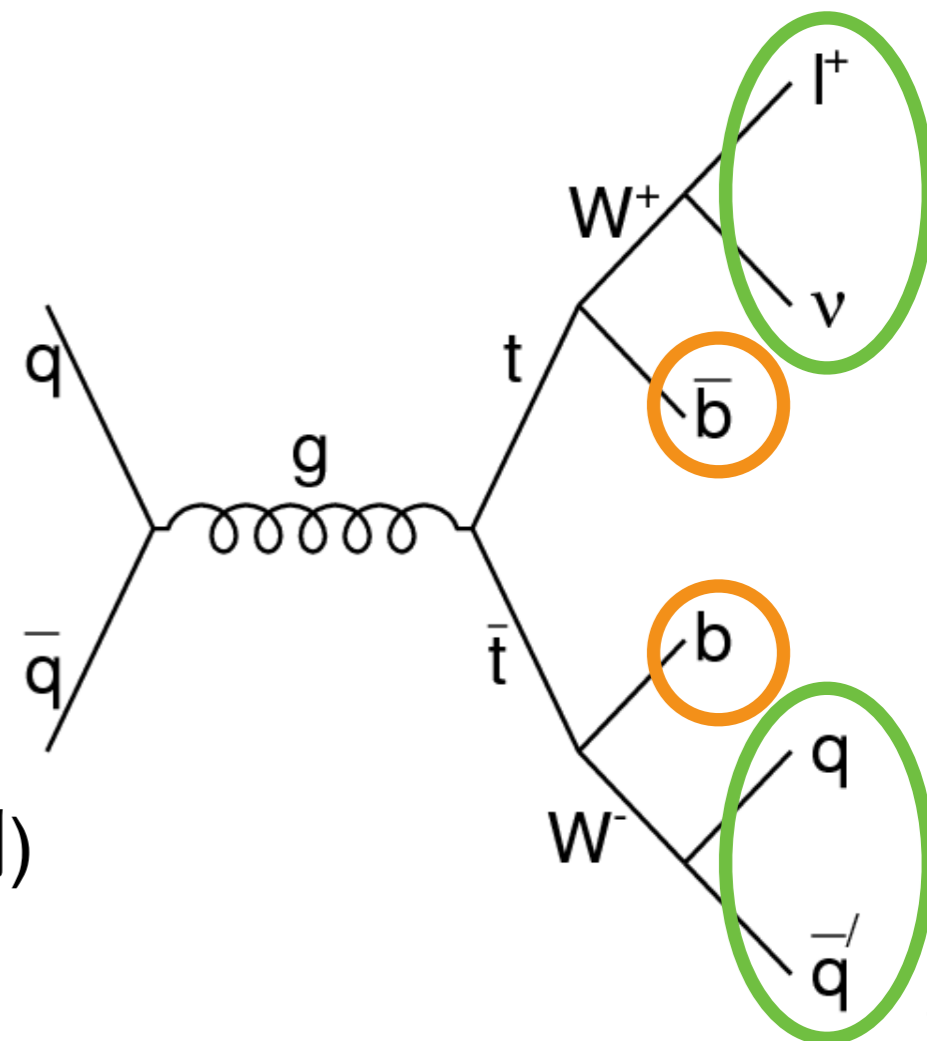
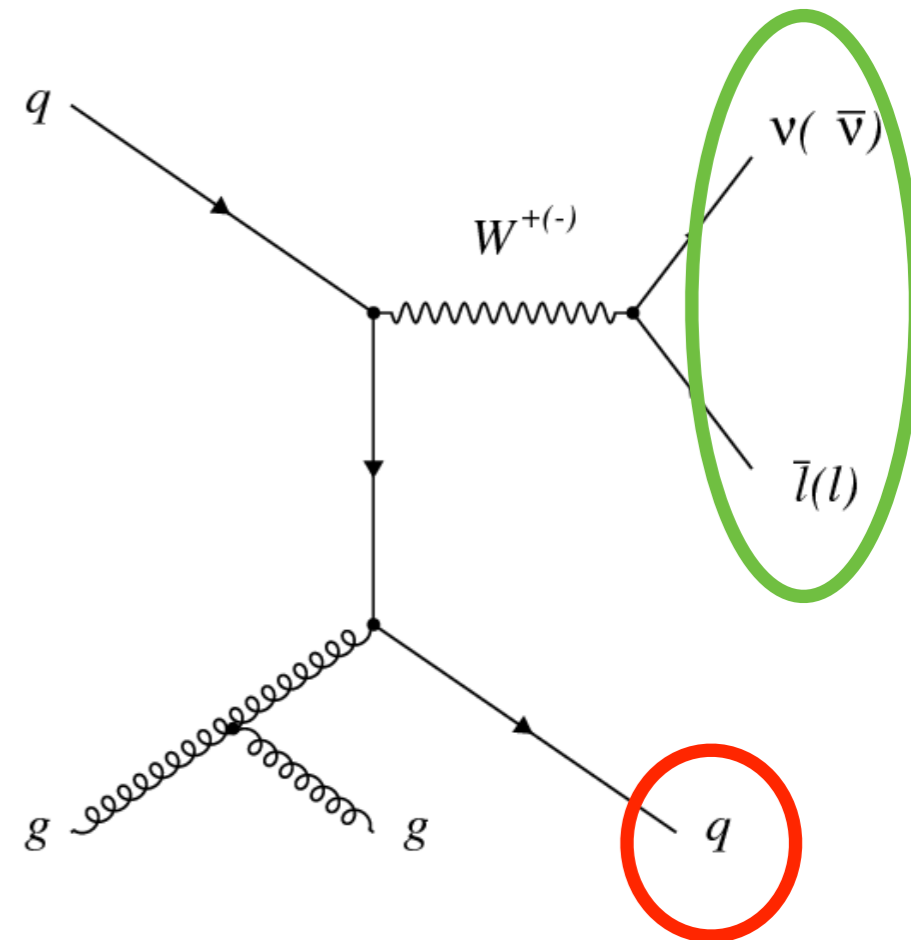
# ボソンタグ効率のパイルアップ依存性



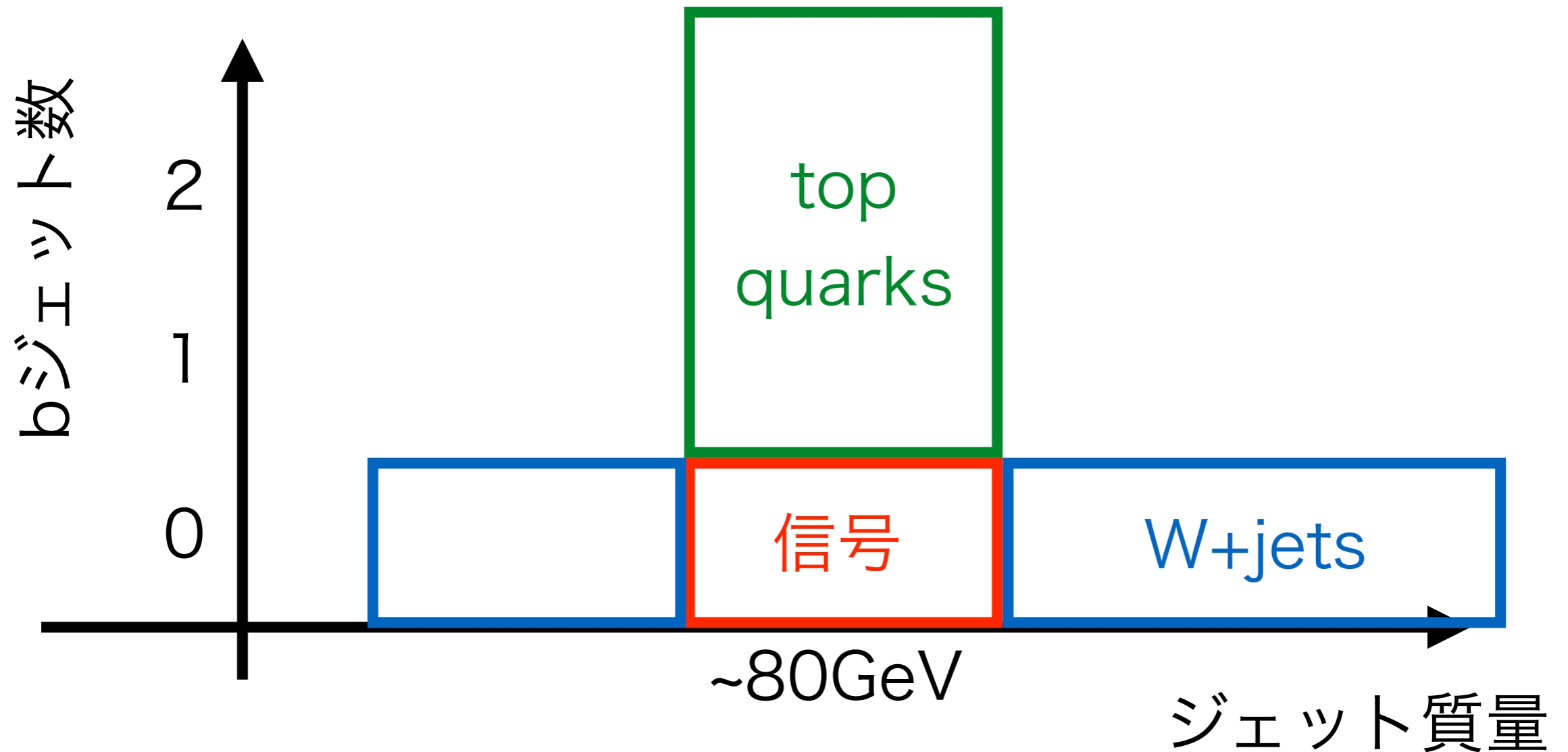
- Combined TA+calo mass+D<sub>2</sub>のefficiencyはパイルアップ~30くらいまではほぼ大丈夫
- パイルアップ~60だと10%ほど効率が落ちてしまう
  - Trimmingパラメータの最適化、根本的なアルゴリズムの改善に取り組んでいる

# WW → lvqq チャンネル

- 2015-16に取得した $36\text{fb}^{-1}$ のデータを用いた結果を公表した
- 事象選別は出来る限りシンプルに
  - レプトン(電子またはミュオン)、
  - ニュートリノ(運動量欠損)、
  - W-likeなハドロンジェット1本を要求し、不変質量を組む(だけ)
- 主な背景事象
  - W+jets (q/g → W fake. 断面積大きい)
  - top quark pair (Irreducible、b-vetoして抑制)

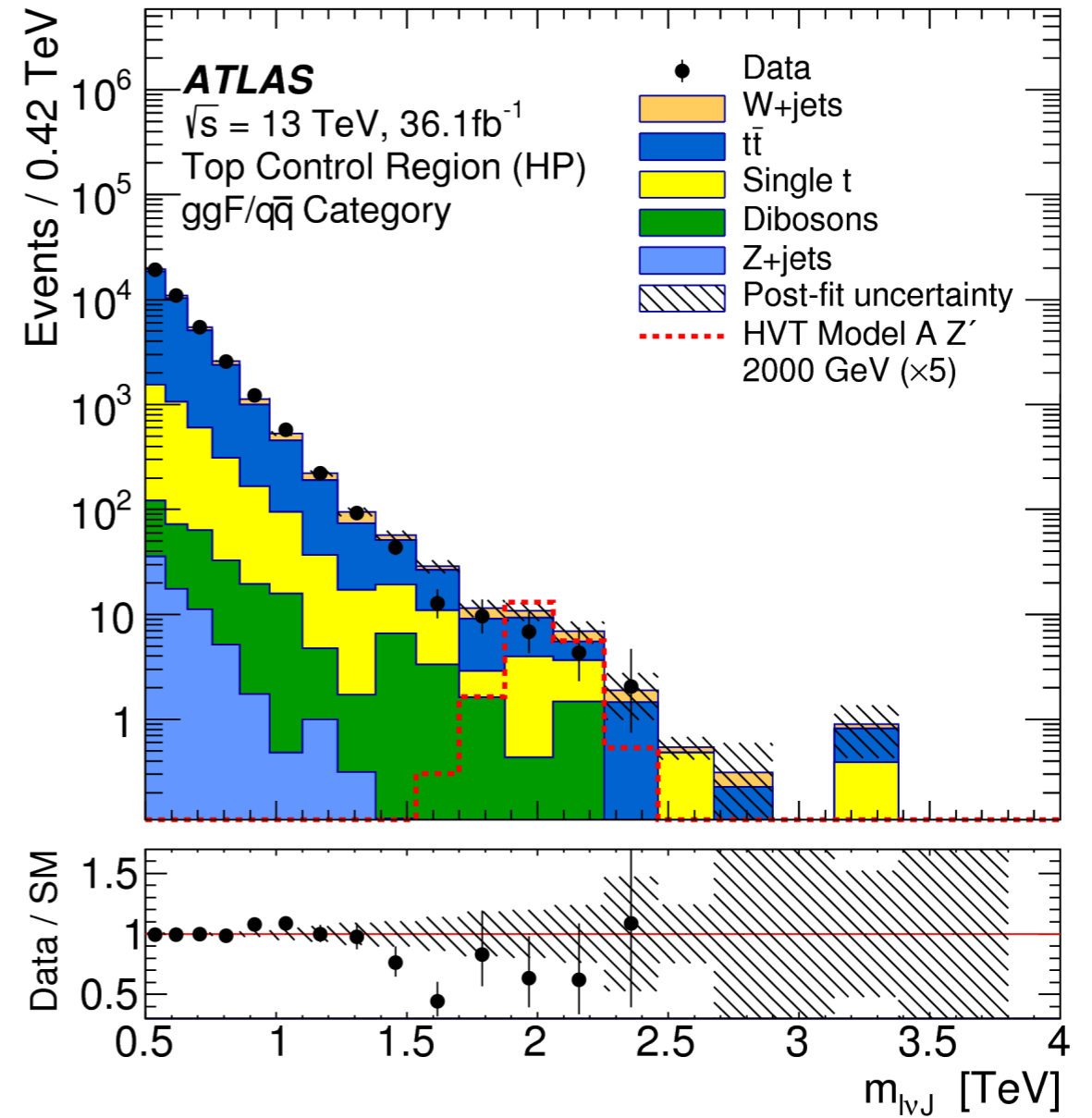
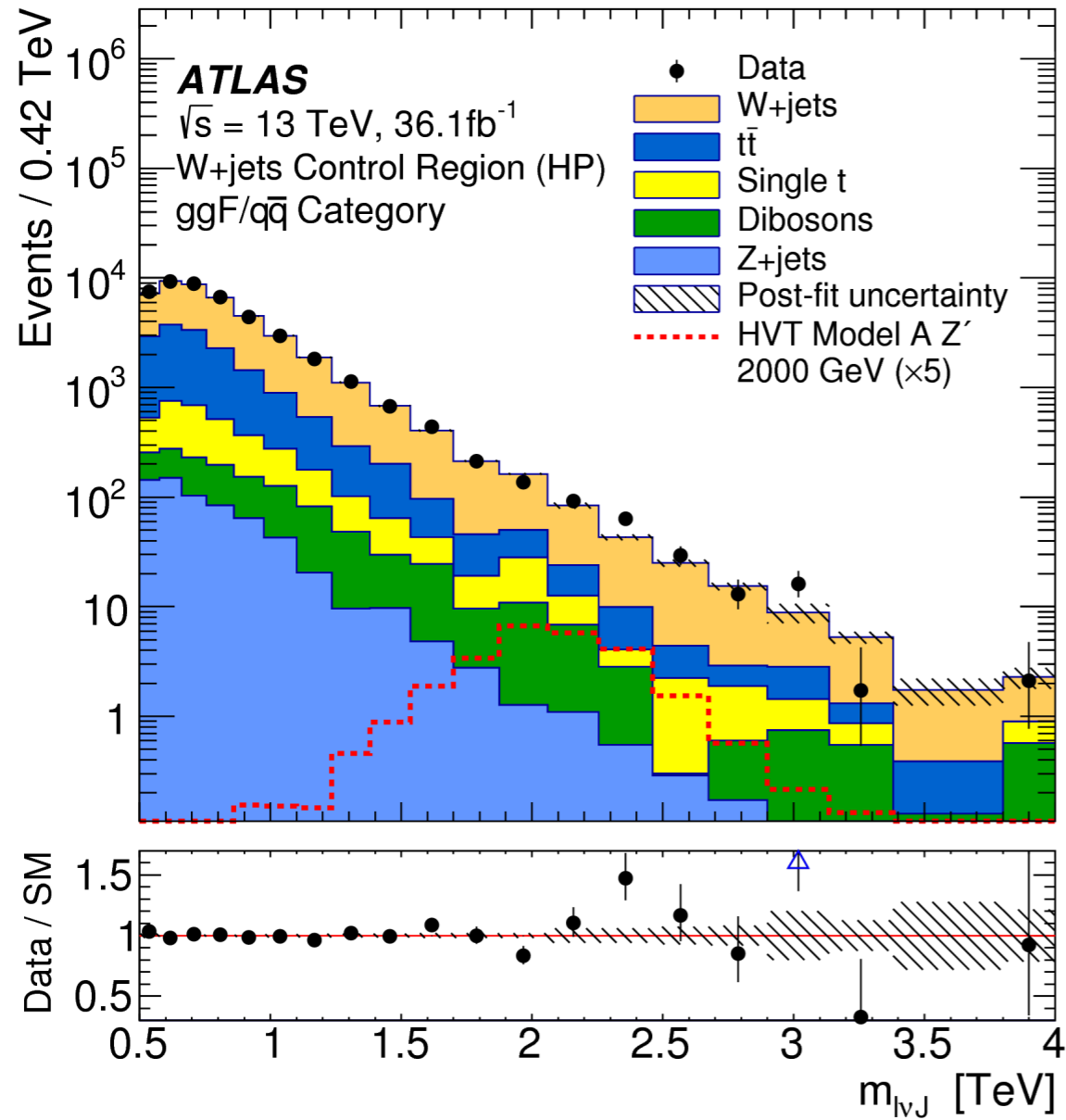


# 背景事象の見積もり



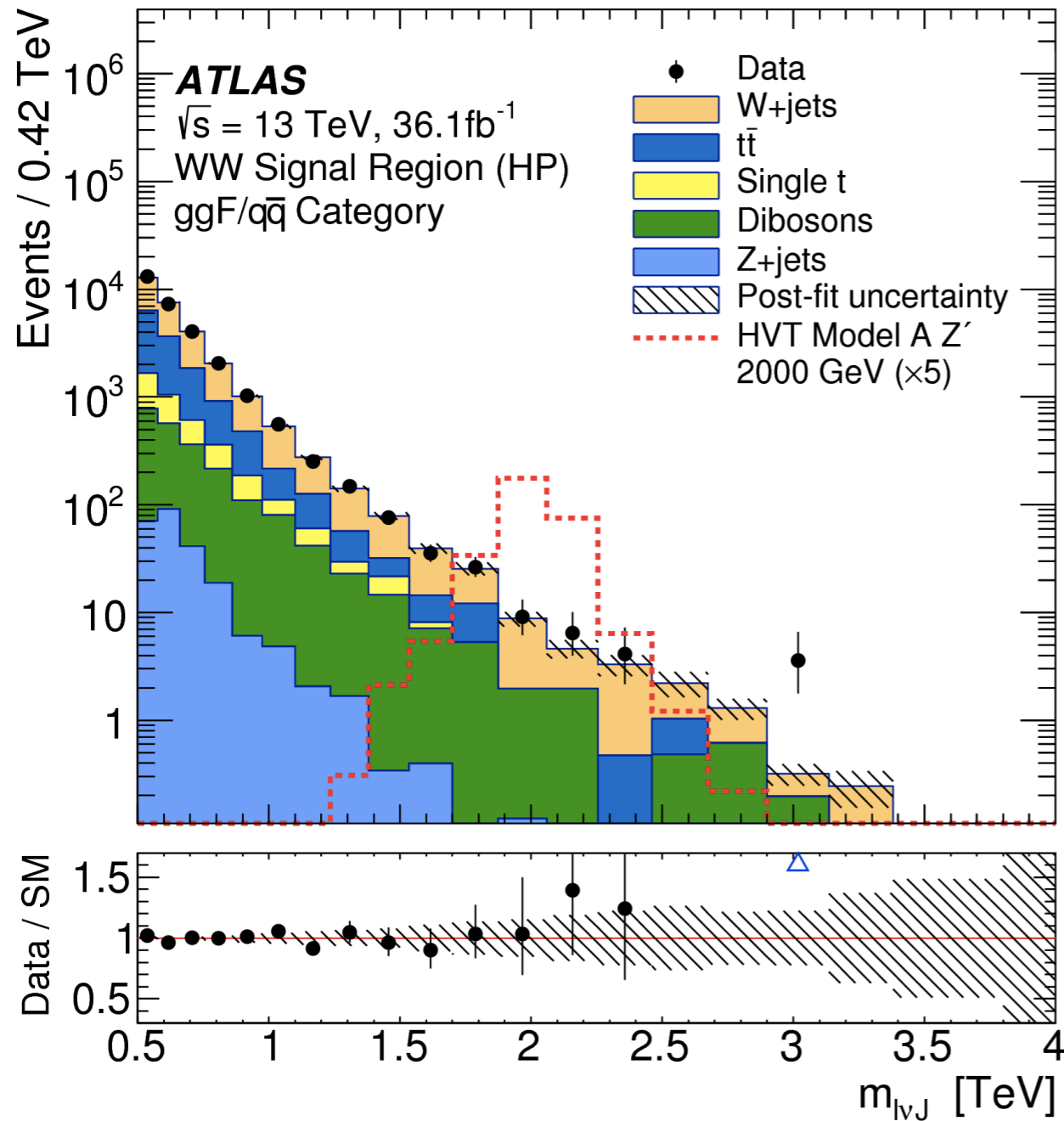
- W+jets & ttbar: 分布はMCを用いる (理論の系統誤差は考慮)
- Normalizationはコントロールサンプルを用いてデータから補正をかける

# コントロール領域の分布



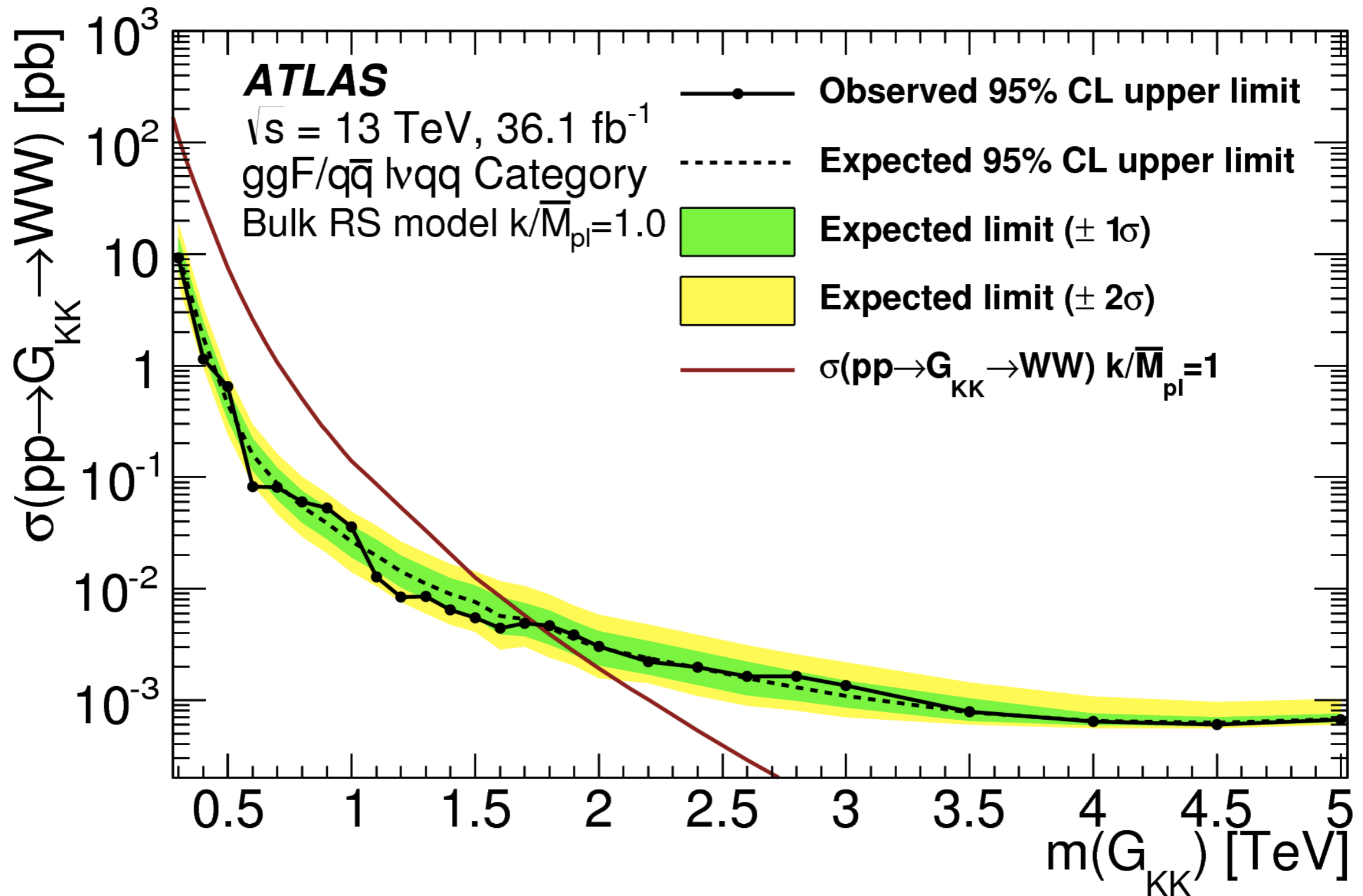


# 探索結果

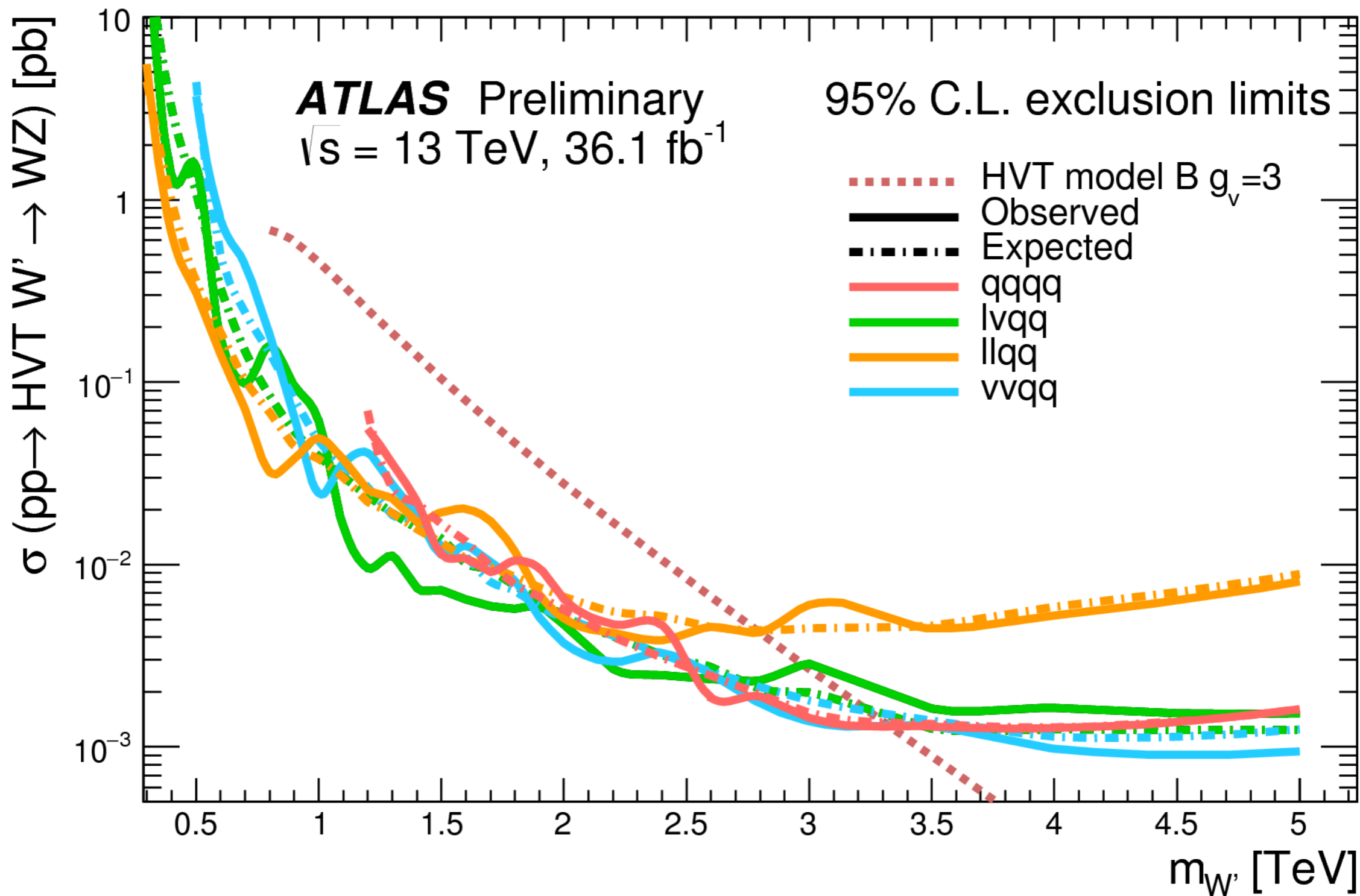


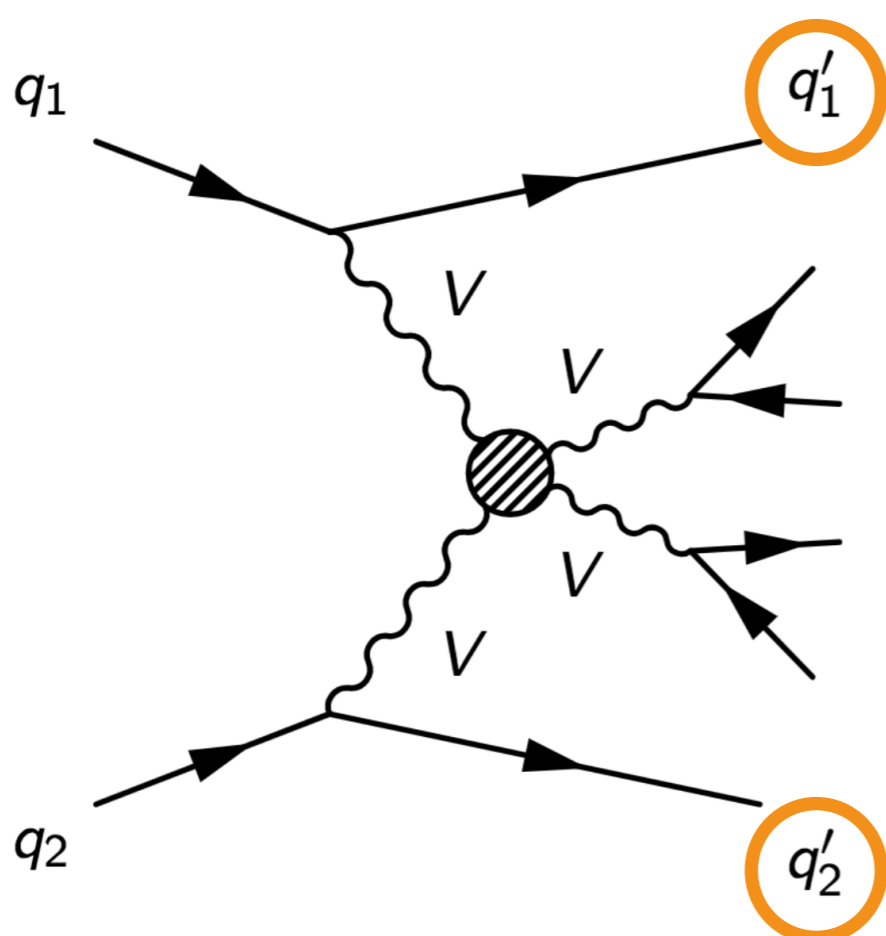
- コントロールサンプルの測定結果を信号領域に外挿
- 有意な信号の兆候は得られなかった
- 主な系統誤差：
  - W+jetsモデリング (QCDスケールのとり方など)、
  - ジェットエネルギースケール、
  - パイルアップはまだそれほど効いていない

# 信号の生成断面積に対する上限値

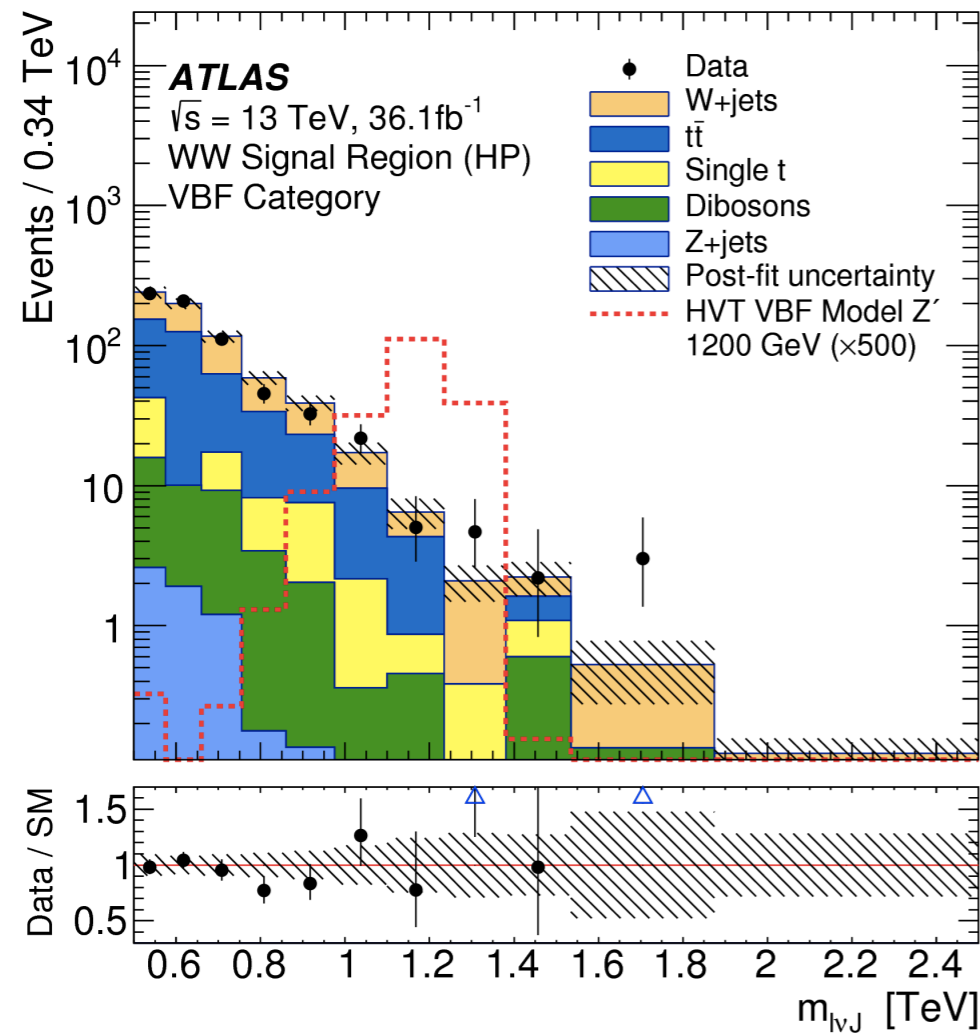
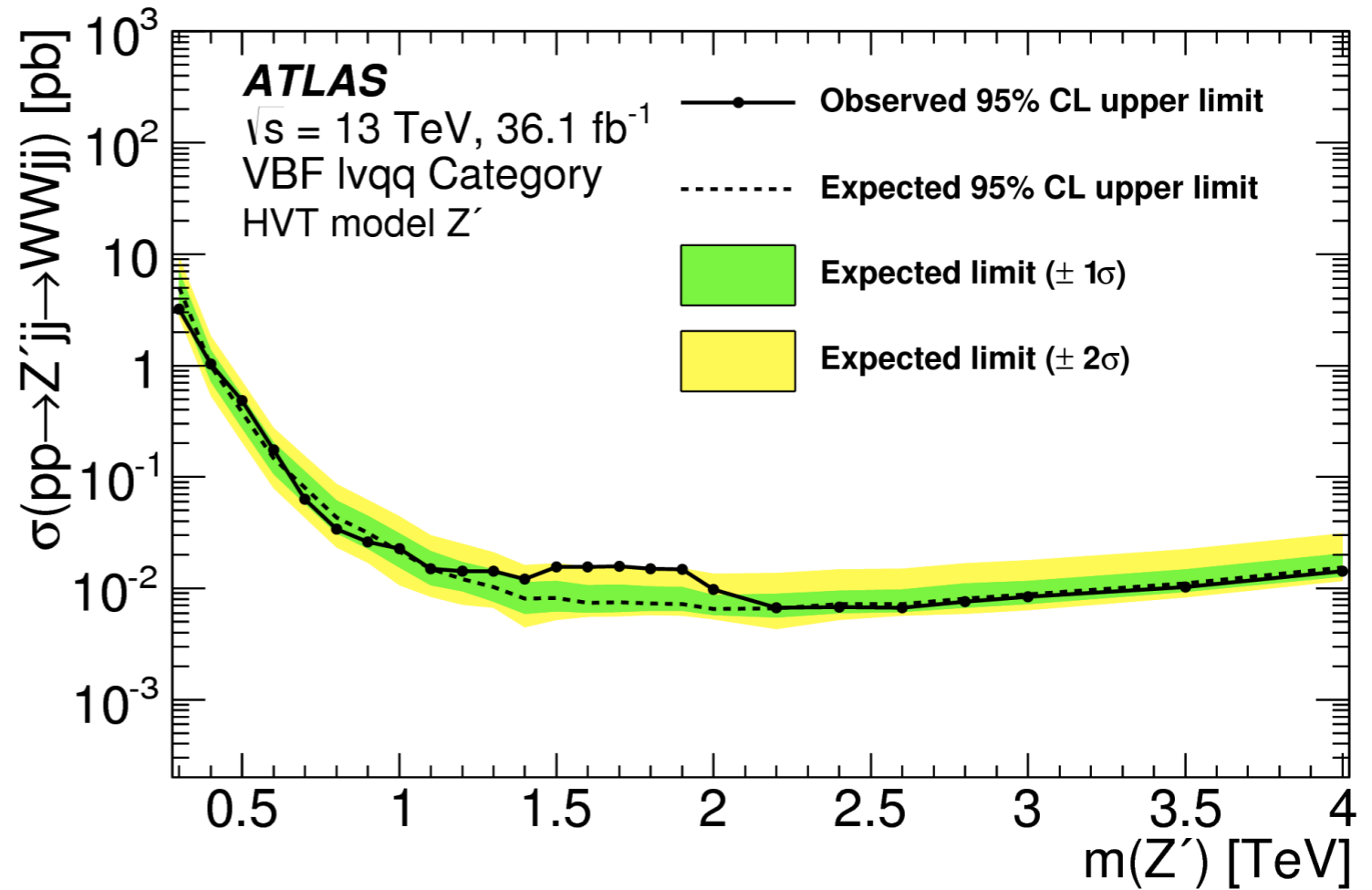


# 他のチャンネルとの比較





# Limit on VBF signal



- 2 forward jets are required
- $m_{jj} > 770 \text{ GeV}$  and  $|\Delta\eta_{jj}| > 4.7$
- 今後、非共鳴信号(VBS)に最適化して探索を続けていく

# まとめ

- ATLASにおけるボソン対生成探索について、最近のボソンタグ改善と1-leptonチャンネルの最新結果を報告した
  - bulk RS  $G^* \rightarrow WW$ は1.75TeVまで棄却
- All channels combinedでpaper執筆中. 今年中には出ます
- 今後もデータを足していき、もっと重いand/or断面積の小さい新物理の発見を目指す
- 鍵をにぎるのは高運動量ジェットの改善
  - 系統誤差の改善
  - ボソンタグのさらなる性能向上（分解能改善、機械学習など）
  - パイルアップ耐性の改善





# Dominant systematic uncertainties

- MC stat is one of the dominant systematics :(
- Large- $R$  jet kinematics and background modeling

ggF/q $\bar{q}$ Category			
$m(WZ) = 2000$ GeV		$m(WW) = 500$ GeV	
Source	$\Delta\mu_{NP}/\mu$ [%]	Source	$\Delta\mu_{NP}/\mu$ [%]
Simulation statistics	12	Large- $R$ jets kinematics	17
$W$ +jets: generator choice	8	Simulation statistics	12
$W$ +jets: scale	5	Top: scale	11
SM diboson normalization	4	SM diboson cross section	10
Large- $R$ jets mass resolution	4	$W$ +jets: alternative generator	10
Large- $R$ jets $D_2$ resolution	4	$W$ +jets: scale	9
Total systematic uncertainties	20	Total systematic uncertainties	42
Statistical uncertainty	50	Statistical uncertainty	18

(1-lepton channel)

# ATLAS detector

- 内部飛跡検出器

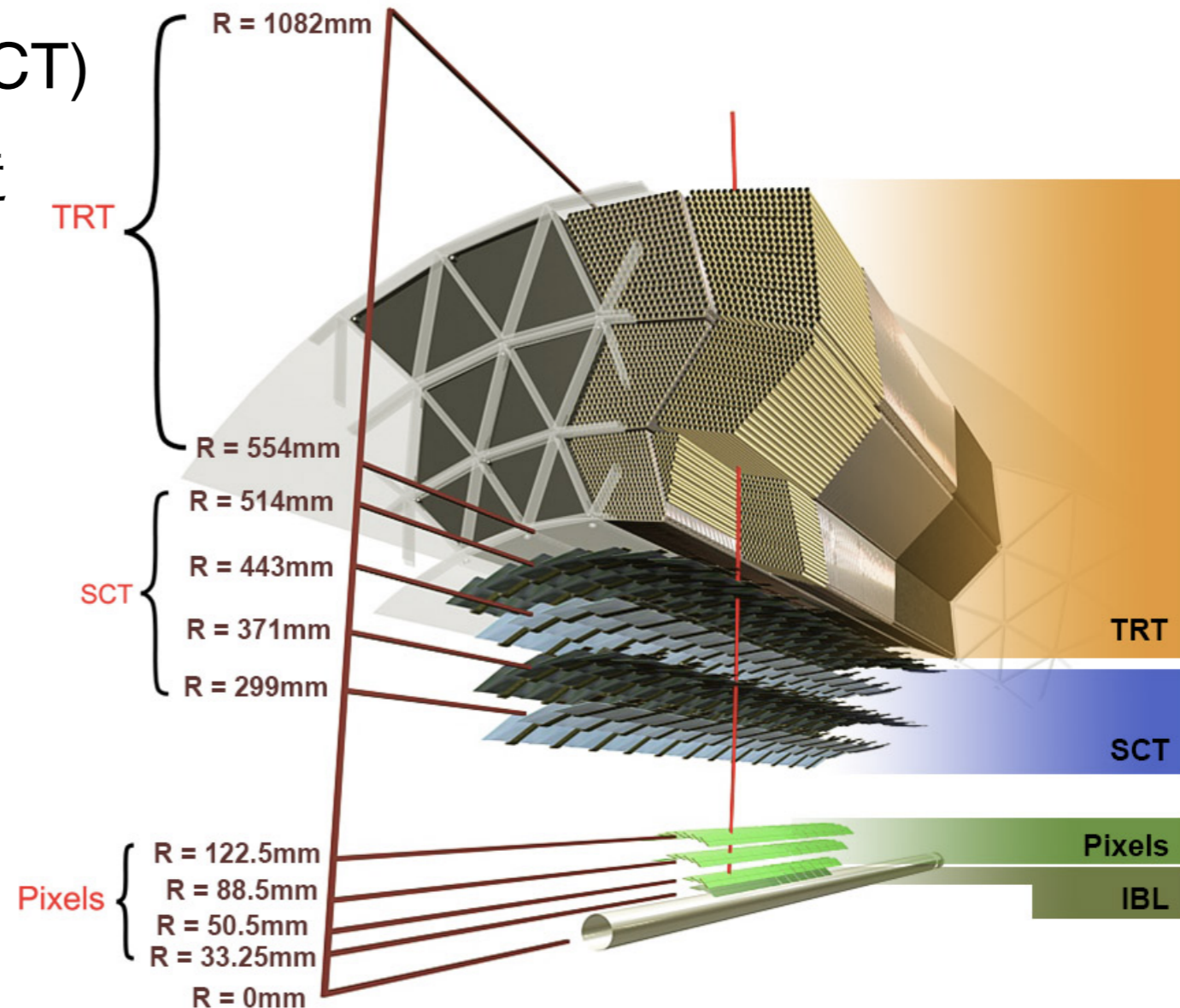
- シリコンピクセル検出器 (PIXELS)
  - シリコンストリップ検出器 (SCT)
  - ガス検出器 (TRT) の層状構造

- 2T ソレノイド磁場で荷電粒子を曲げて運動量測定

- $\sigma(p_T)/p_T = 0.05\% p_T \oplus 1\%$

- Vertexを再構成するため高いread-out granularity

- c.f. IBL spatial resolution:  $\sim 15 \mu\text{m}$



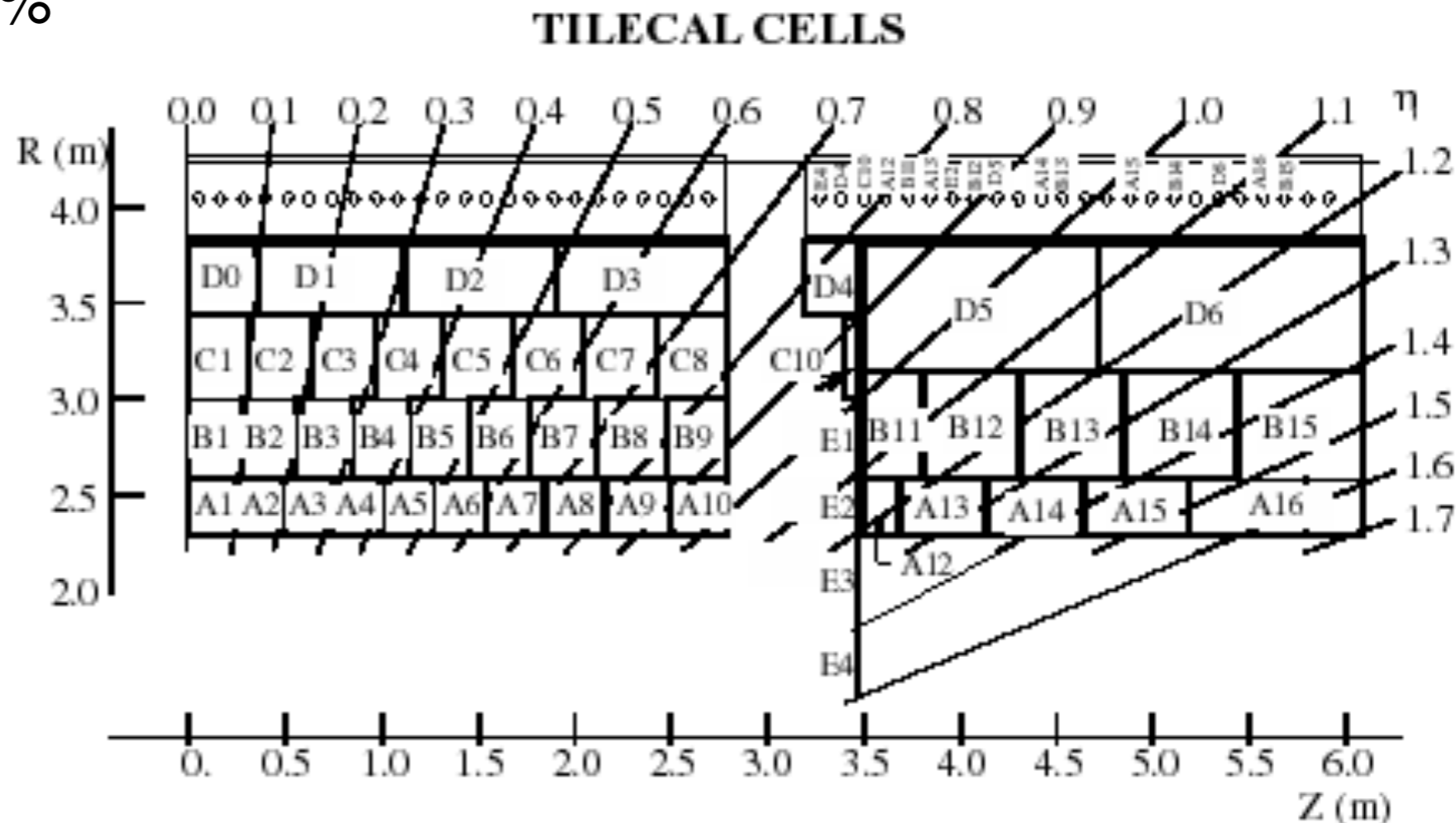
# ATLAS detector (cont'd)

- ハドロンカロリメータ

- $|\eta| < 1.7$  鉄吸収体+シンチレータースタイルのサンプリングカロリメータ  
(検出器前方はLArカロリメータ)

- $\sigma(E)/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

- Read-out granularity:  
 $\Delta\eta \times \Delta\Phi = 0.1 \times 0.1$



# $D_2^{\beta=1}$ and $\tau_{21}$

- Decay of W/Z : 2-prong-like

- A variable:  $D_2^{\beta=1} = E_{CF3} \left( \frac{E_{CF1}}{E_{CF2}} \right)^3$

is used to enhance signals

$$E_{CF1} = \sum_i p_{T,i}$$

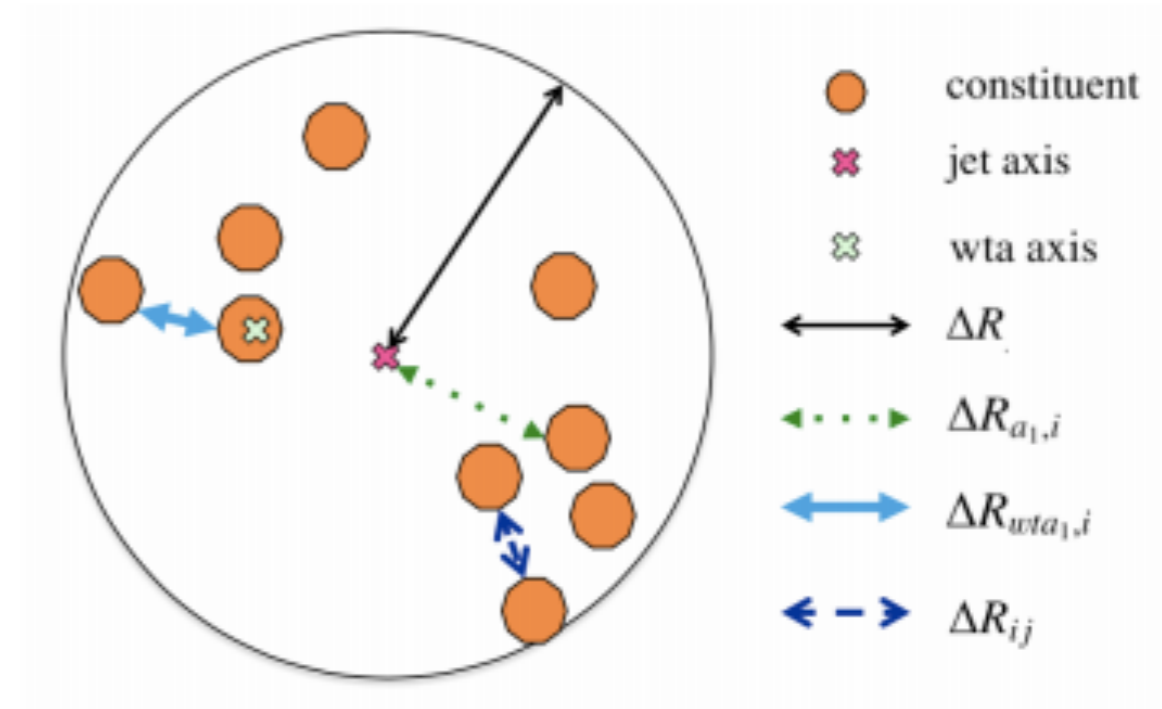
$$E_{CF2} = \sum_{ij} p_{T,i} p_{T,j} \Delta R_{ij}$$

$$E_{CF3} = \sum_{ijk} p_{T,i} p_{T,j} p_{T,k} \Delta R_{ij} \Delta R_{jk} \Delta R_{ki}$$

- 2-prongを仮定してsubjets a1, a2を定義。その軸からの角度を用いて、

- A variable:  $\tau_{21} = \frac{\sum_i p_{T,i} \min(\Delta R_{a1,i}, \Delta R_{a2,i})}{\sum_i p_{T,i} \Delta R_{i,j}}$

is used in CMS

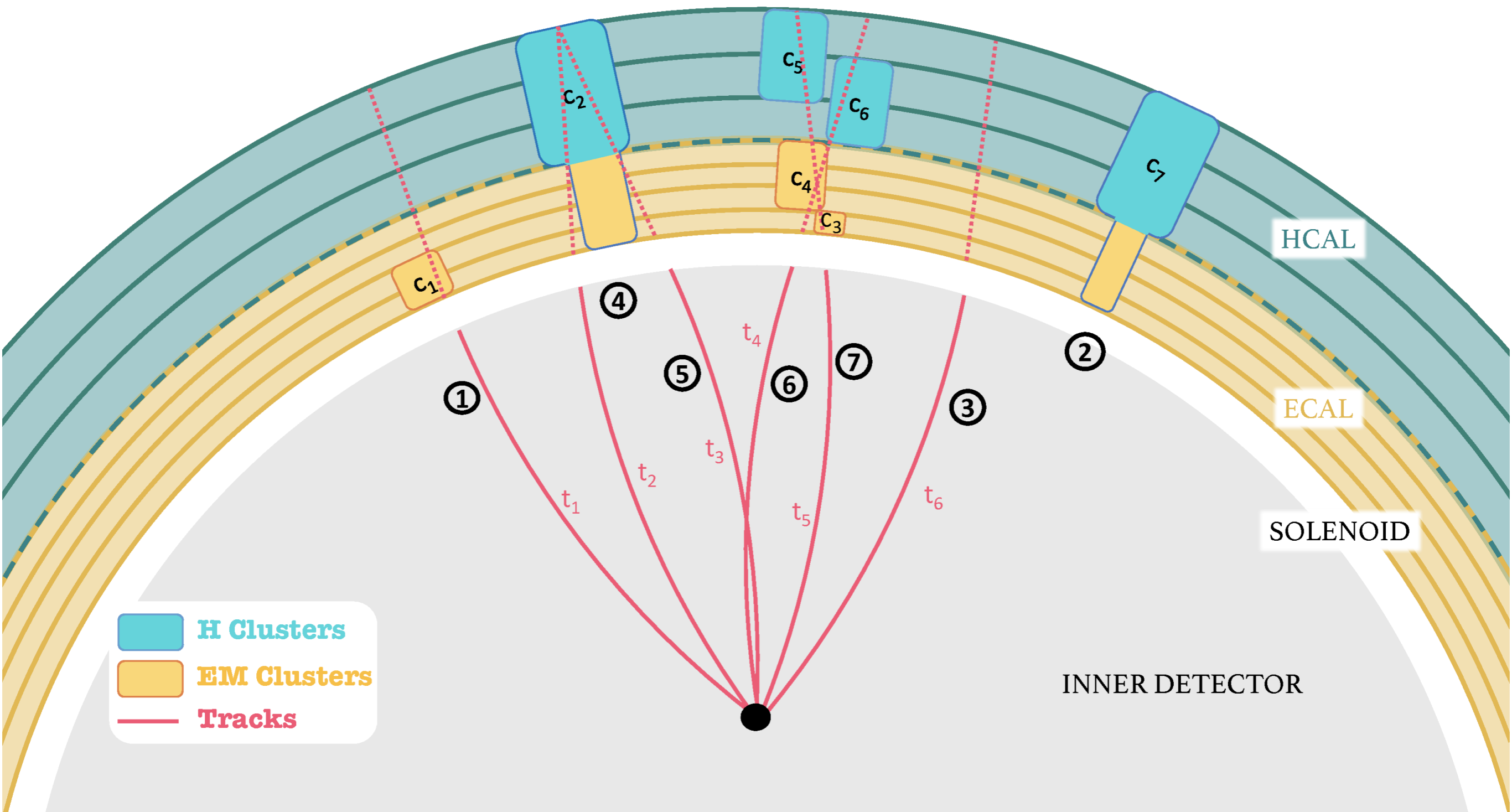


There're 2 high- $p_T$  constituents with large  $\Delta R_{ij}$ ; and no the other constituents with high- $p_T$ :

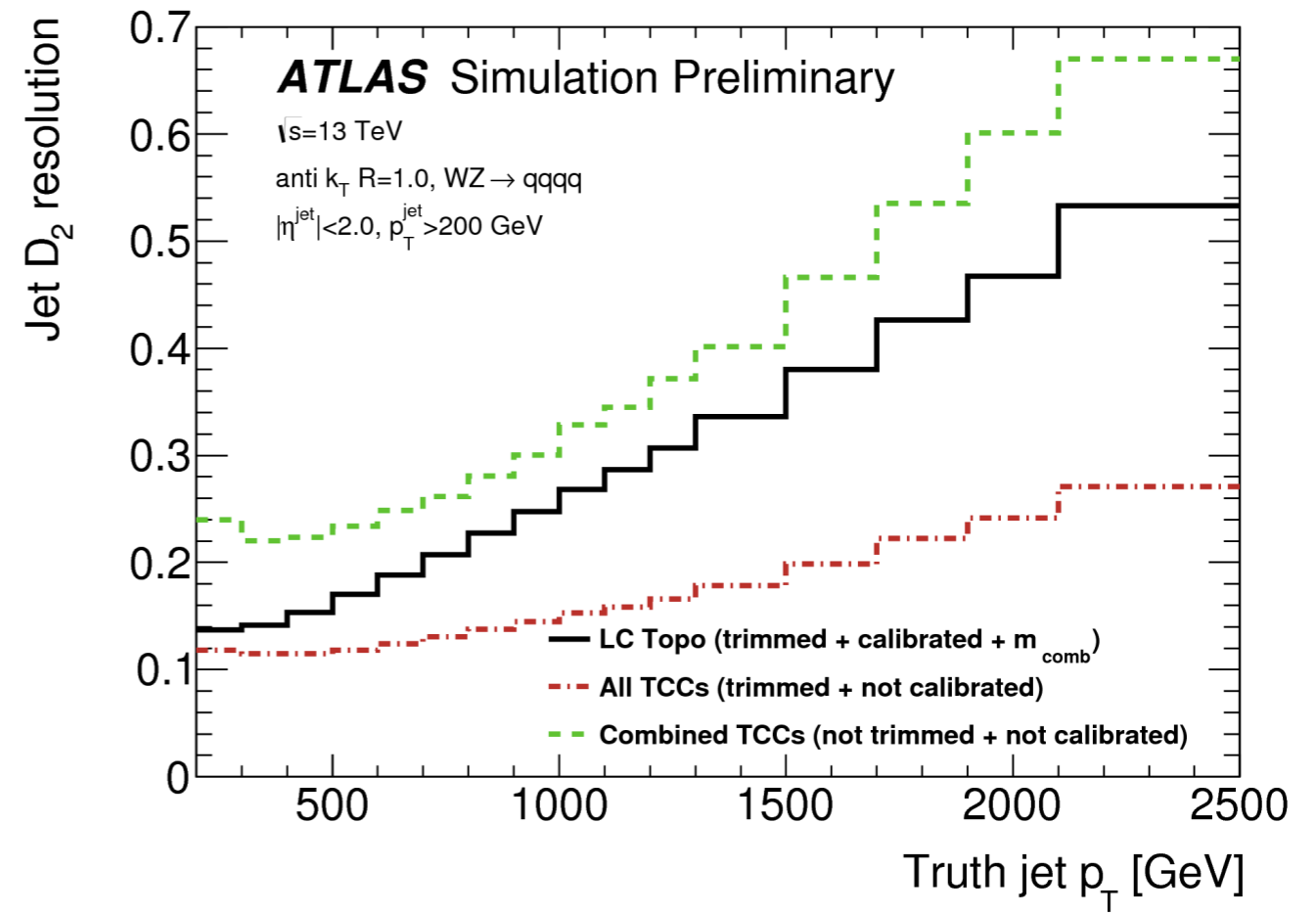
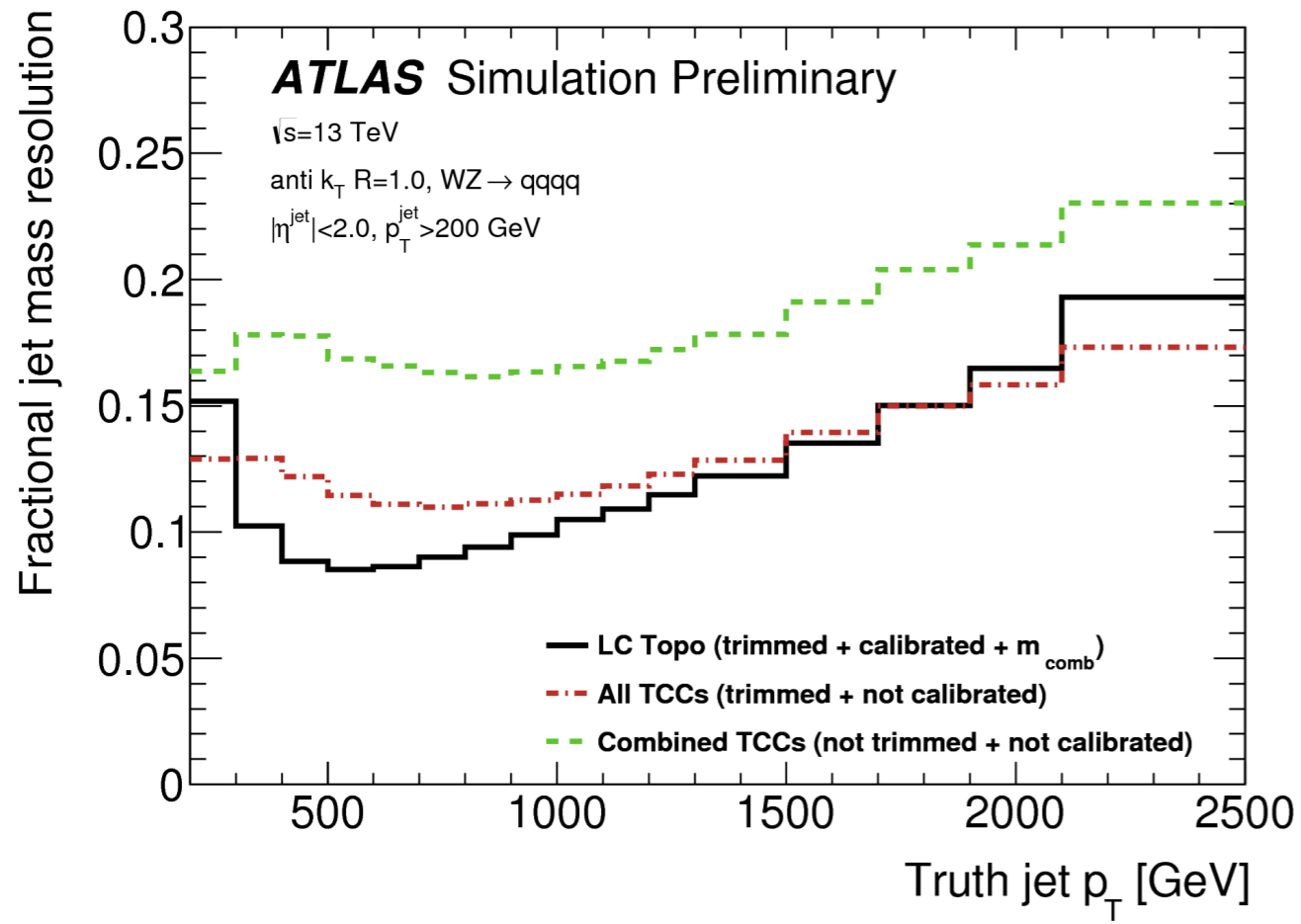
→ **large  $E_{CF2}$  but small  $E_{CF3}$**



# Track-Calo cluster

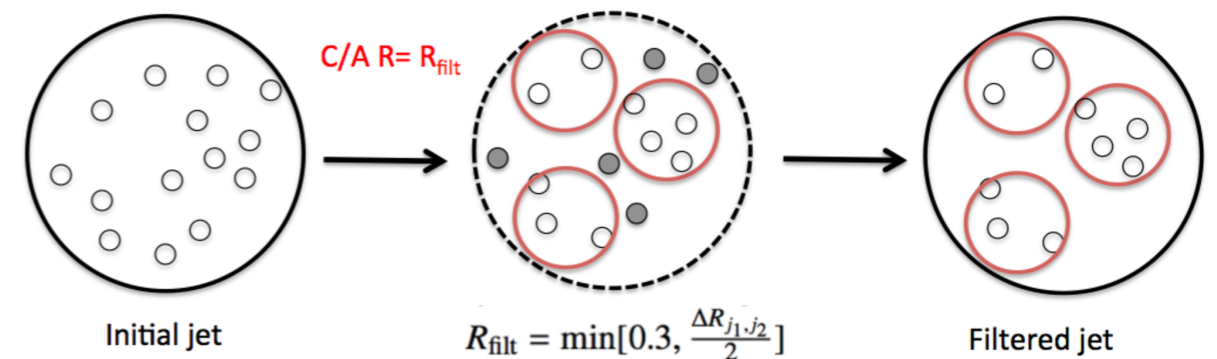
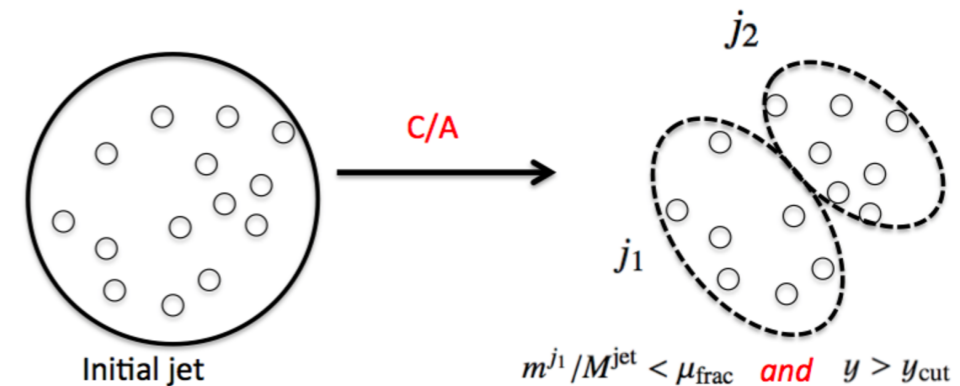
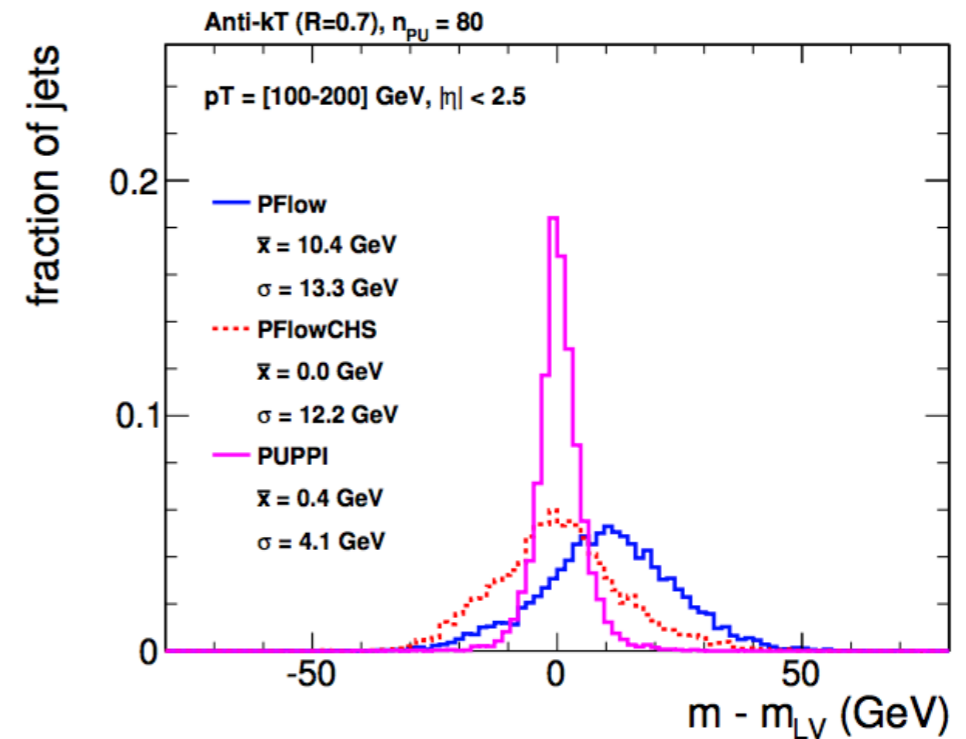


# TCC jetの性能



# CMSのパイルアップ対策

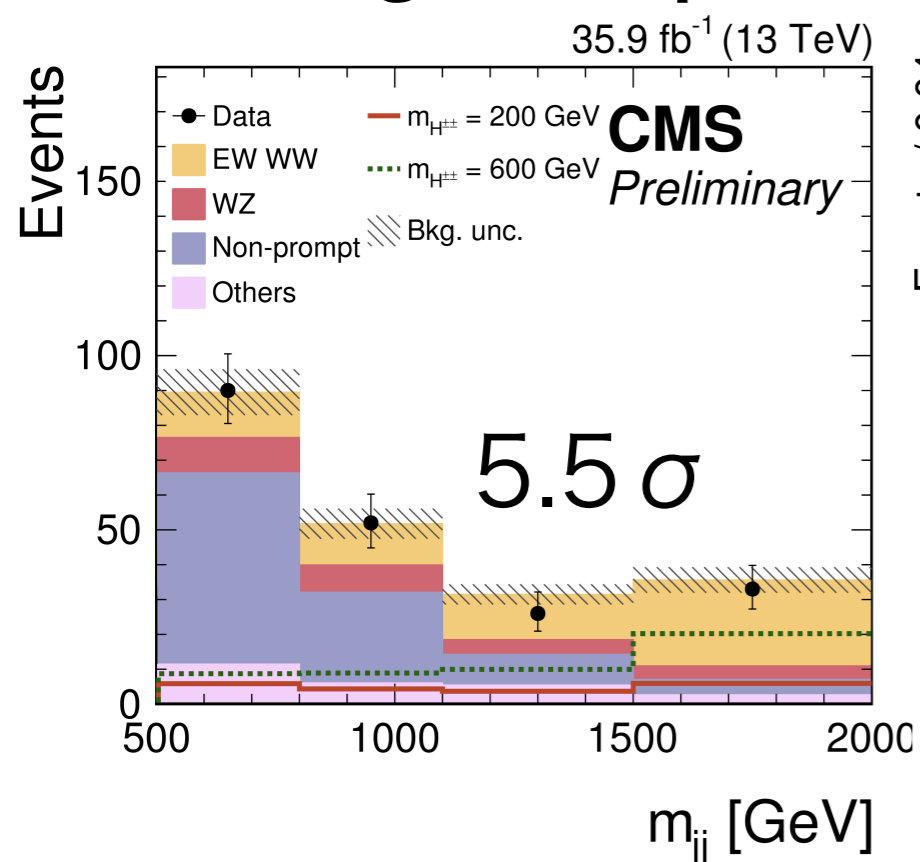
- **PUPPI** (pileup per particle identification)
  - ジェットを構成する「粒子」そのものに着目
  - それぞれの粒子がパイルアップ由来かどうかをパラメータ化
- **Soft drop**: C/A algorithmで組みなおした2つのsub-jetの $p_T$ がバランスするまでソフトな成分は落とす
- Soft dropとtrimming (ATLAS)はほぼおなじ性能。ATLASもper-particle PU subtractionに向けて動き始める



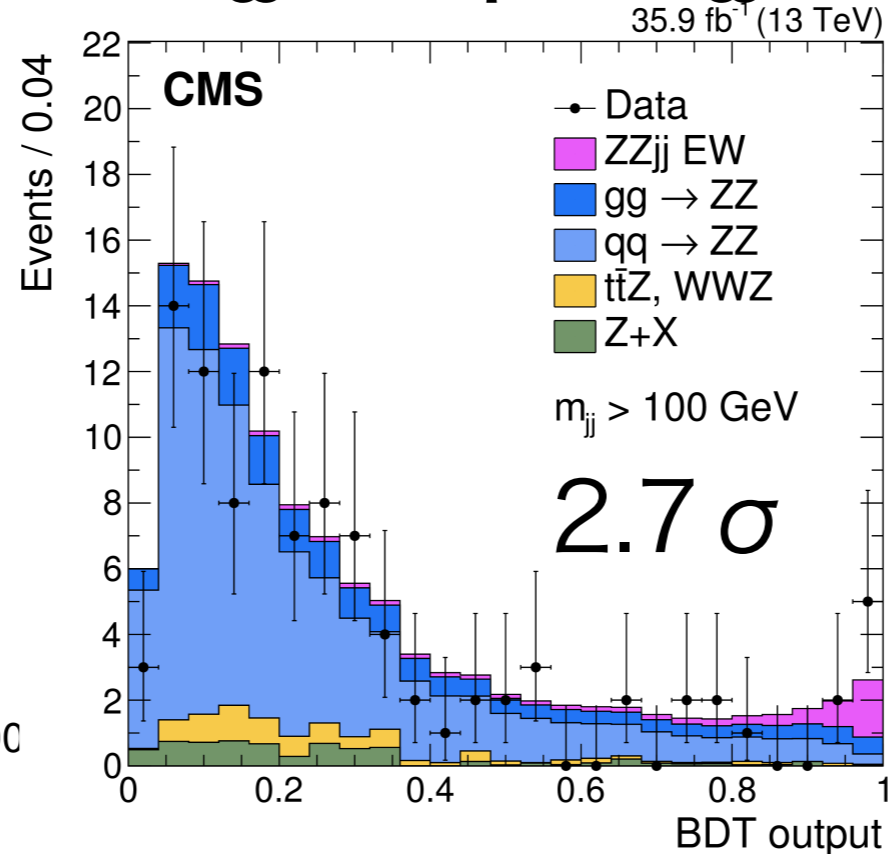
# EW VBS cross section 測定結果

- Same-sign di-lepton:
  - ATLAS 8TeV  $3.6\sigma$  ( $2.5\sigma$  expected)
  - CMS 13TeV  $5.5\sigma$  ( $5.7\sigma$  expected), 8TeV  $2.0\sigma$  ( $3.5\sigma$  expected)
- $ZZ \rightarrow 4\text{-lepton}$ : CMS 13TeV 4-lepton  $2.7\sigma$  ( $1.7\sigma$  expected)
- $WV \rightarrow l\nu qq$ : 8TeV only. Branching fractionの分high-massまでprobe可

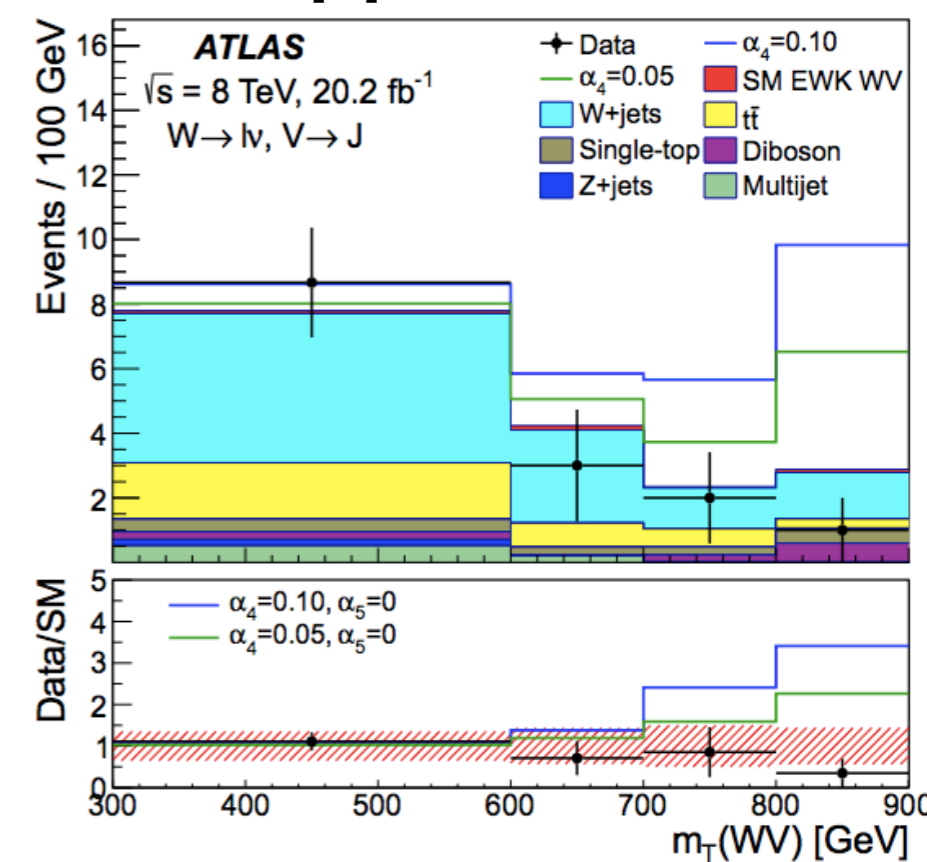
## same-sign di-lepton



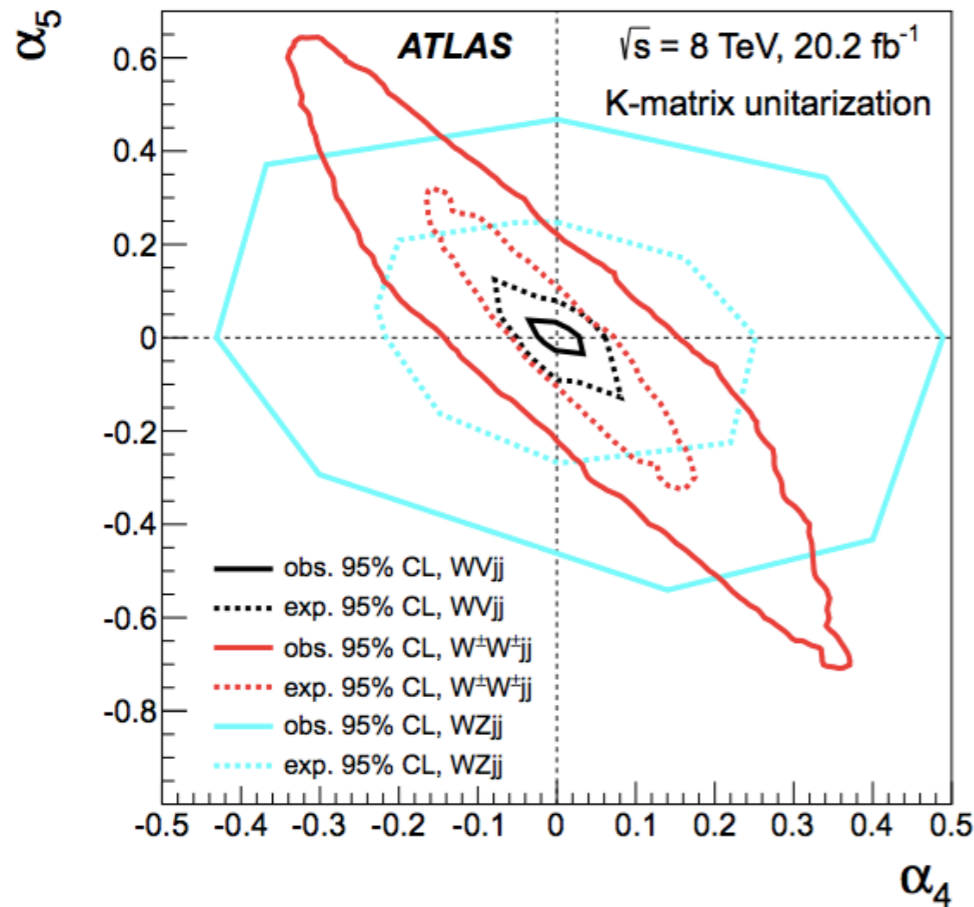
## $ZZjj \rightarrow 4\text{lepton} + jj$



## $l\nu qq$



# aQGCに対する制限



- ATLAS 8TeV:  $O(p^4)$ 項をSMに加え制限を設けた

$$\alpha_4 \mathcal{L}_4 = \alpha_4 \text{tr}[\mathbf{V}_\mu \mathbf{V}_\nu] \text{tr}[\mathbf{V}^\mu \mathbf{V}^\nu],$$

$$\alpha_5 \mathcal{L}_5 = \alpha_5 \text{tr}[\mathbf{V}_\mu \mathbf{V}^\mu] \text{tr}[\mathbf{V}_\nu \mathbf{V}^\nu],$$

- High-massで感度があるためlvqqからの制限が強い
- CMS & ATLAS 13TeV: dimension-8 operatorのco-efficient (Eboli model [link])に対して制限

- scalar型(S)、tensor型(T)、混合型(M)で18個の dimension-8演算子 e.g.

$$\mathcal{O}_{S,0} = [(D_\mu \Phi)^\dagger D_\nu \Phi] \times [(D^\mu \Phi)^\dagger D^\nu \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{S,1} = [(D_\mu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi] \times [(D_\nu \Phi)^\dagger D^\nu \Phi],$$

$$\mathcal{O}_{S,2} = [(D_\mu \Phi)^\dagger D_\nu \Phi] \times [(D^\nu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi],$$

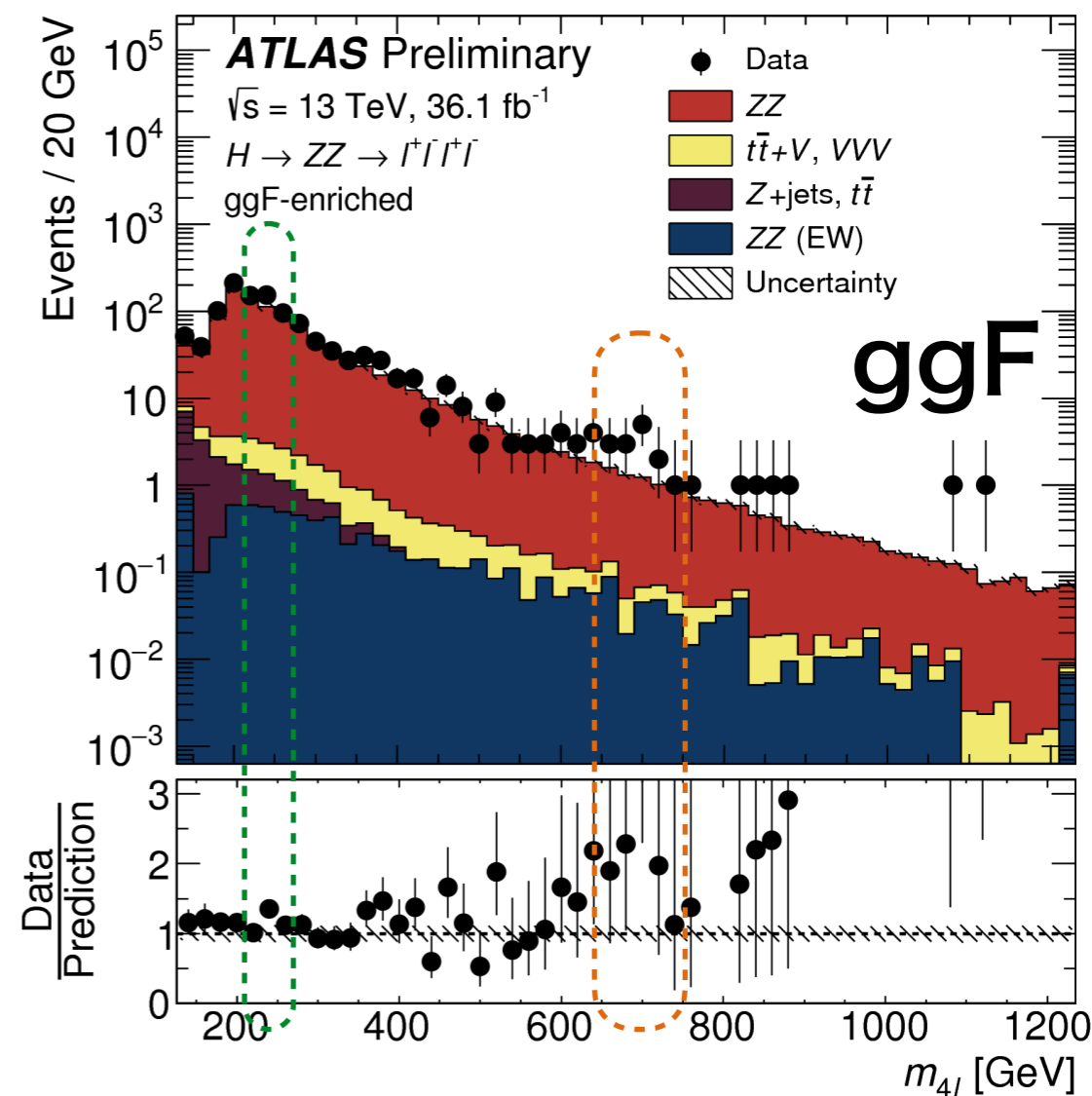
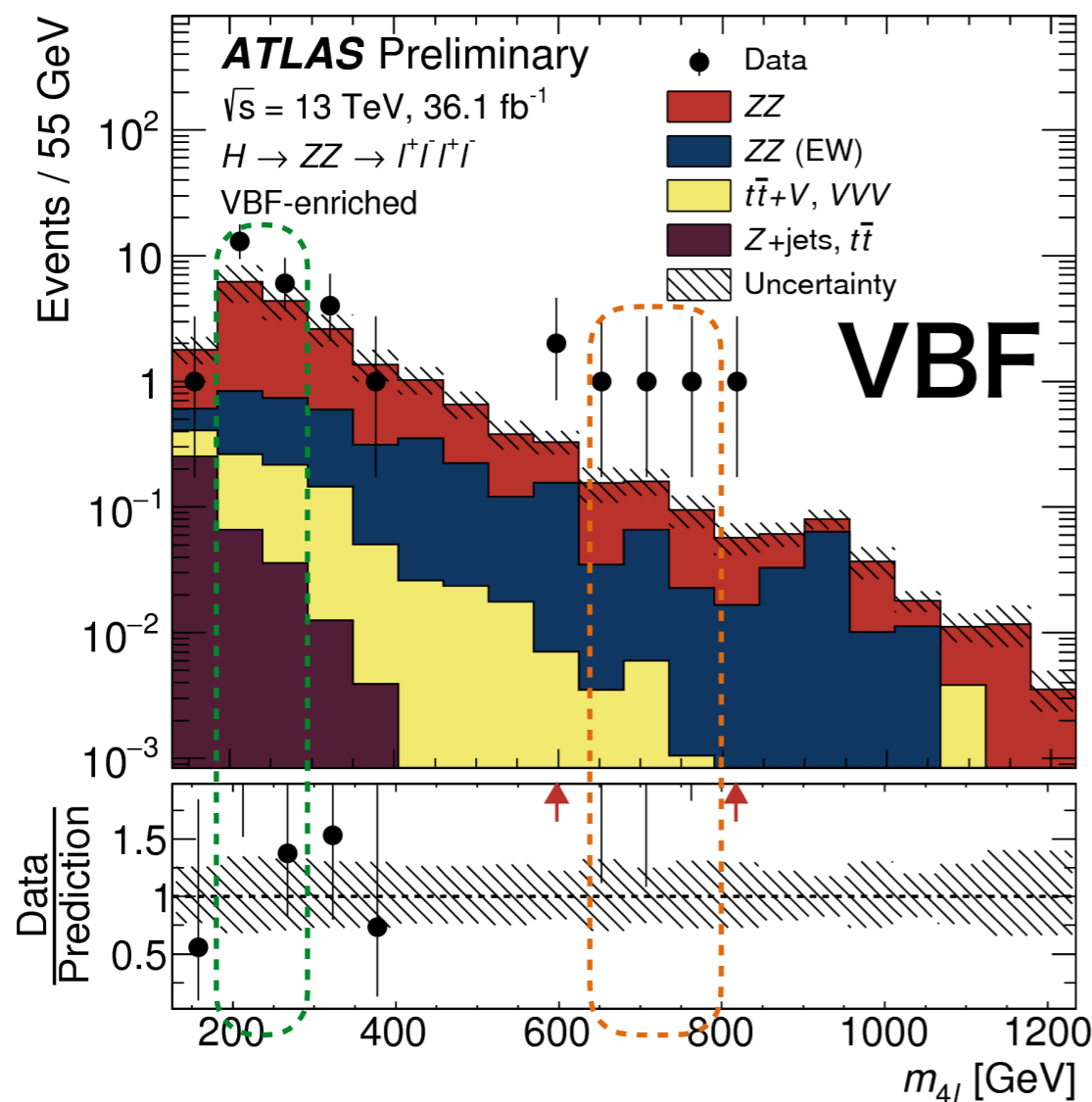
- ssWWは8TeV→13TeVで5倍の感度増
- CouplingによってZZ→4leptonやγγ→WWが良い感度を持つ  
全チャンネルでの測定が大事

	Observed limits (TeV <sup>-4</sup> )	Expected limits (TeV <sup>-4</sup> )	Previously observed limits (TeV <sup>-4</sup> )
$f_{S0}/\Lambda^4$	[-7.7, 7.7]	[-7.0, 7.2]	[-38, 40] , [11]
$f_{S1}/\Lambda^4$	[-21.6, 21.8]	[-19.9, 20.2]	[-118, 120] , [11]
$f_{M0}/\Lambda^4$	[-6.0, 5.9]	[-5.6, 5.5]	[-4.6, 4.6] , [36]
$f_{M1}/\Lambda^4$	[-8.7, 9.1]	[-7.9, 8.5]	[-17, 17] , [36]
$f_{M6}/\Lambda^4$	[-11.9, 11.8]	[-11.1, 11.0]	[-65, 63] , [11]
$f_{M7}/\Lambda^4$	[-13.3, 12.9]	[-12.4, 11.8]	[-70, 66] , [11]
$f_{T0}/\Lambda^4$	[-0.62, 0.65]	[-0.58, 0.61]	[-0.46, 0.44] , [37]
$f_{T1}/\Lambda^4$	[-0.28, 0.31]	[-0.26, 0.29]	[-0.61, 0.61] , [37]
$f_{T2}/\Lambda^4$	[-0.89, 1.02]	[-0.80, 0.95]	[-1.2, 1.2] , [37]



## ZZ → 4-lepton

- 2つの $Z \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$ 候補を探して不変質量を組むシンプルな解析
- 崩壊分岐比は小さいが背景事象が極めて少なく、断面積の大きい低質量領域で感度が高い
- Local  $3.6\sigma$  excess @  $m \sim 240\text{GeV}$  &  $m \sim 700\text{GeV}$

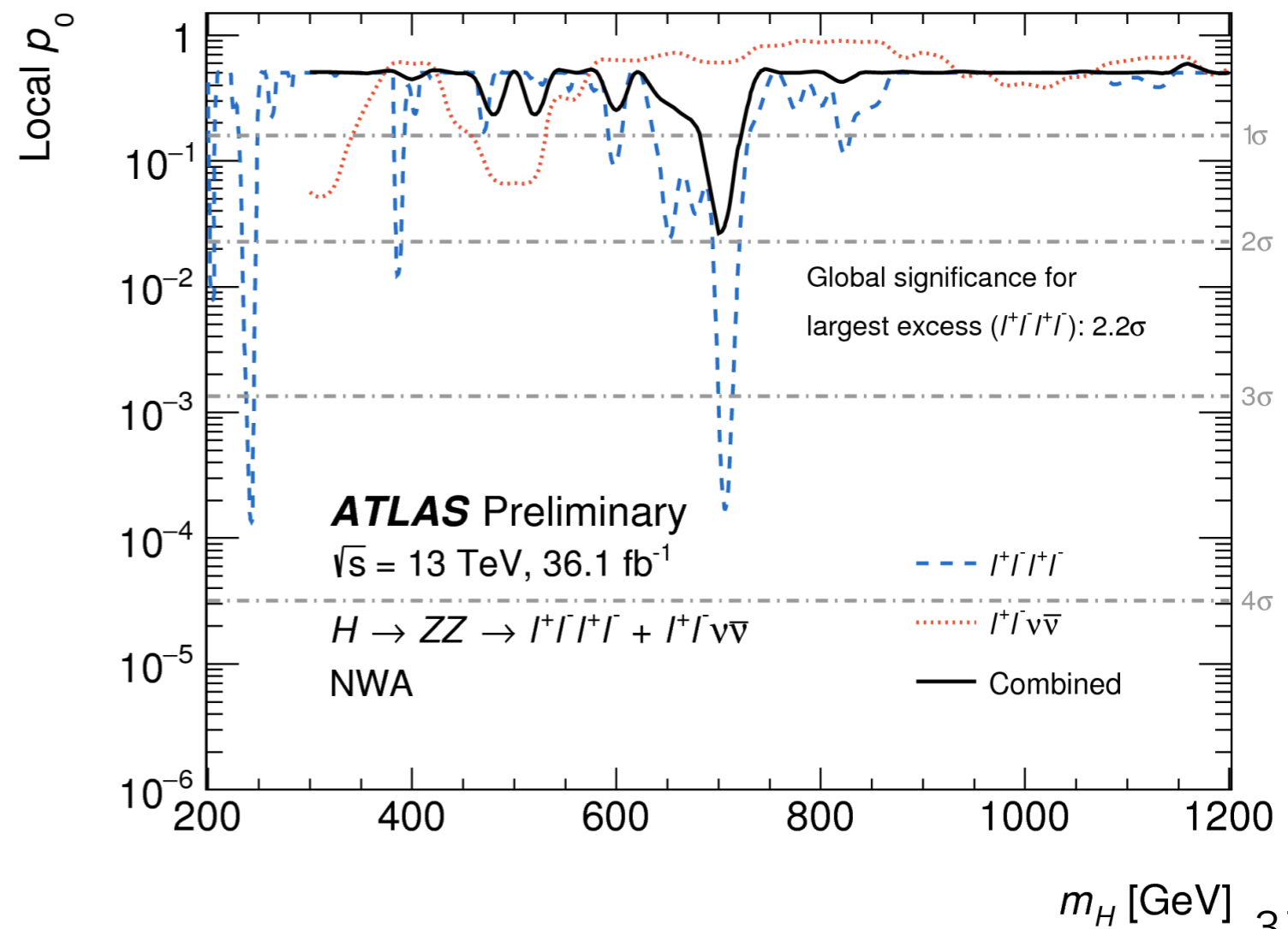
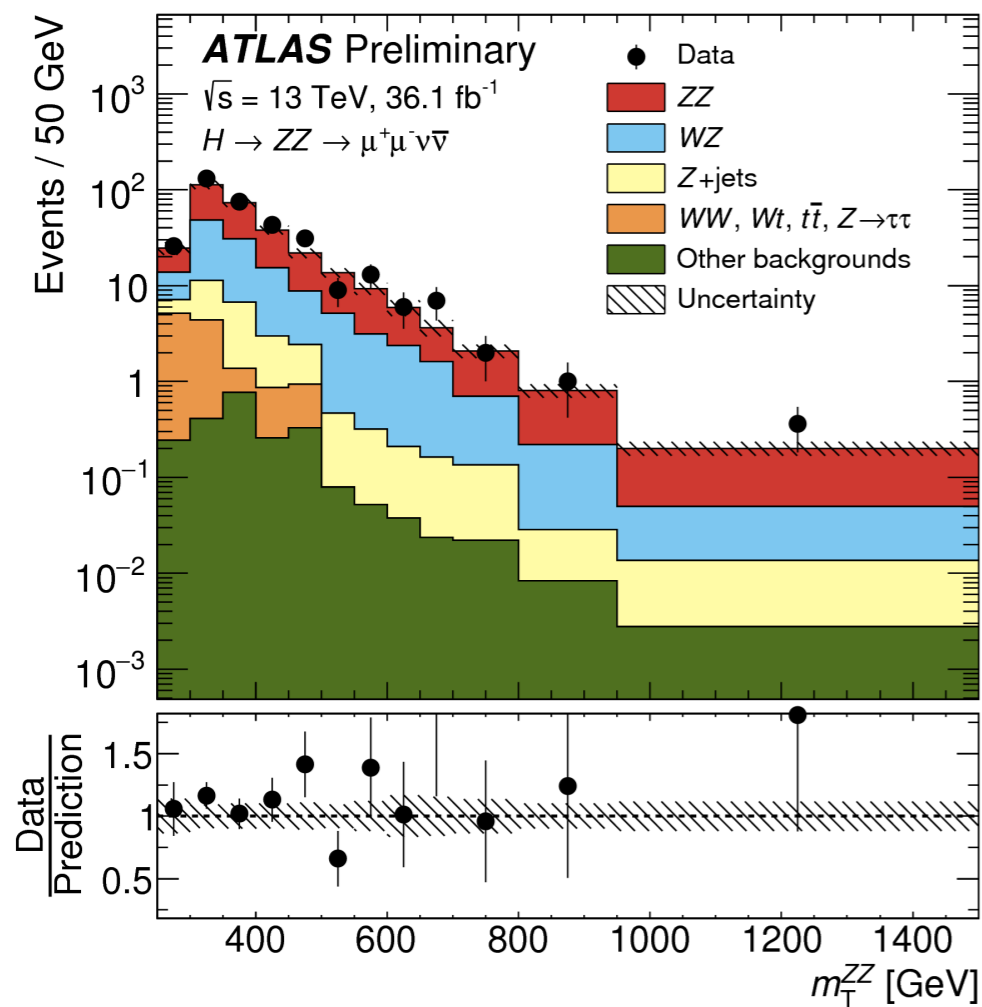




## $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$

- $ll\nu\nu$ チャンネルでは700GeVのexcessは確認されなかった
- 組み合わせるとlocal significance  $\sim 2\sigma$
- CMSも標準模型とconsistentな結果

### $\mu\mu\nu\nu$ channel



# 2HDMに対する制限

