

LHC-ATLAS実験Run2における セミレプトニック崩壊を用いた 弱ボソン散乱過程の探索

2020年 2月 17日

第26回 ICEPP シンポジウム @志賀高原

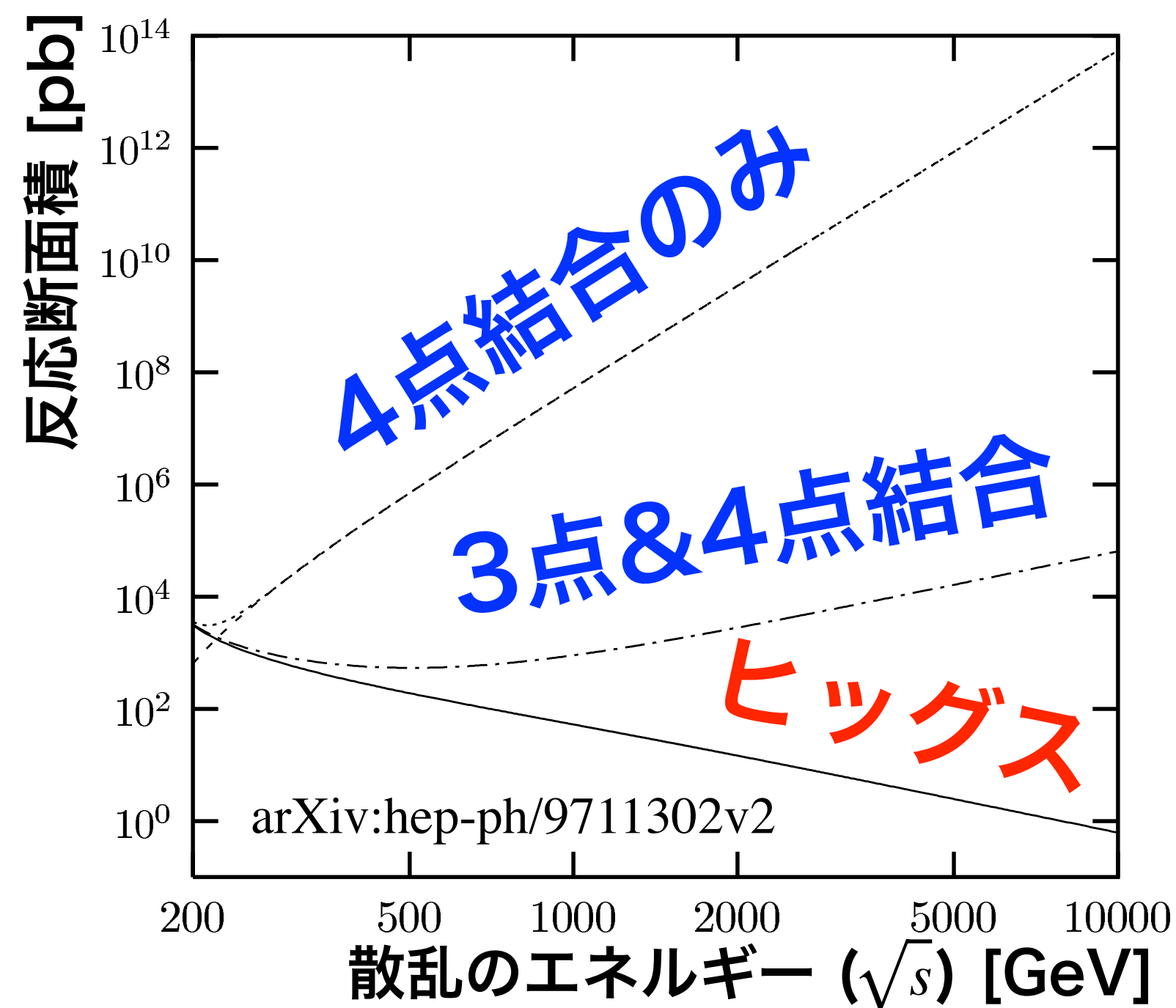
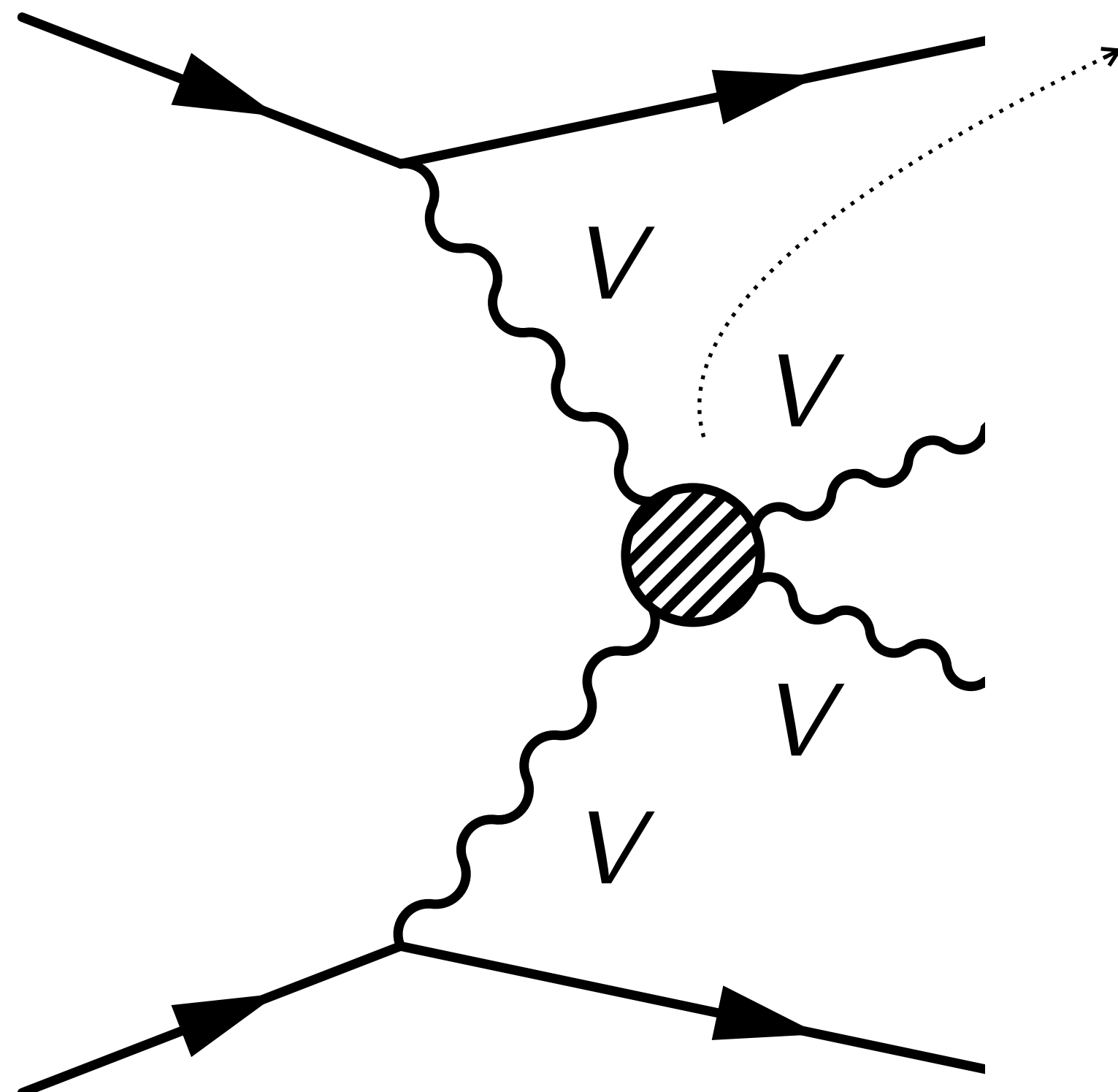
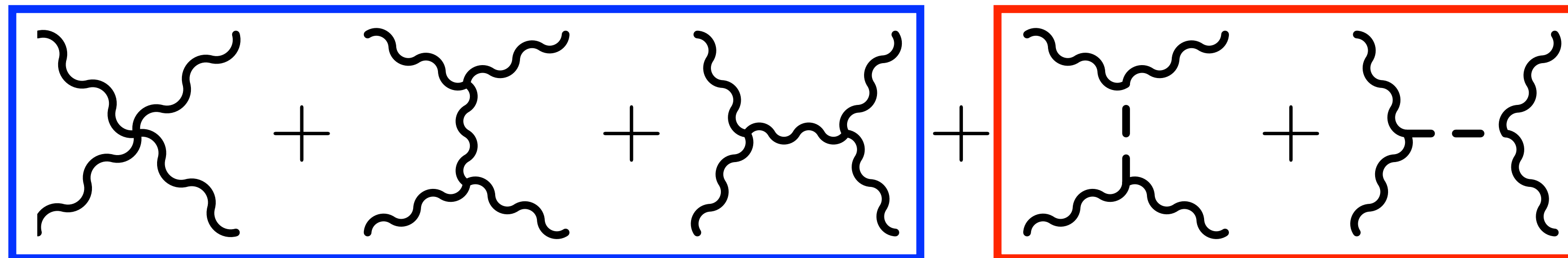
早稲田大学 新田 龍海

研究対象と動機

$A \sim g^2 \frac{E^2}{M_W^2}$
←→
キャンセル!
 $A \sim -g^2 \frac{E^2}{M_W^2}$

研究対象: VBS

(Weak Vector Boson Scattering)
(弱ベクトルボソン散乱)



ヒッグス粒子が散乱振幅の
ユニタリティを守る

→ ヒッグス粒子の役割の検証

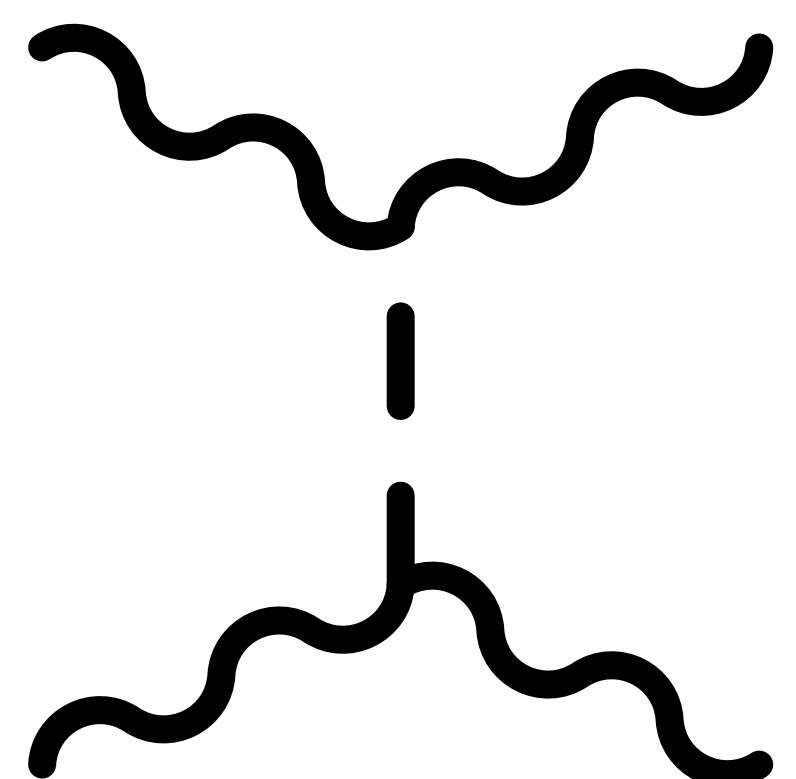
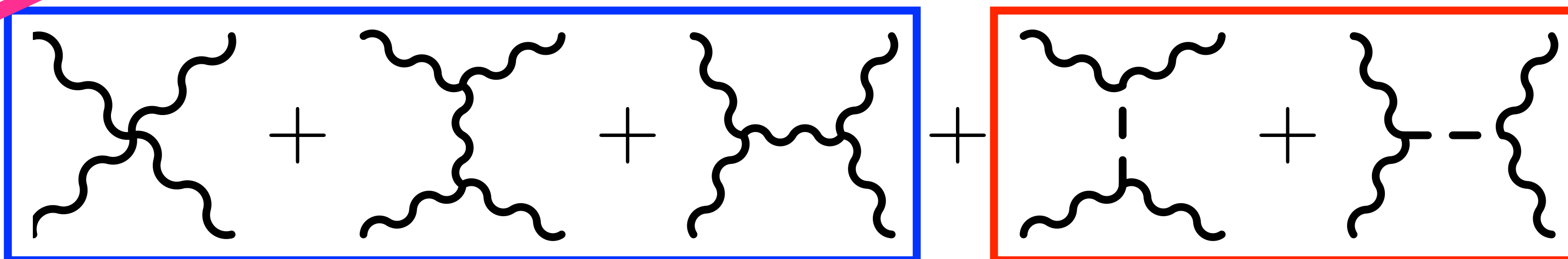
純粋な電弱相互作用の過程

研究動機

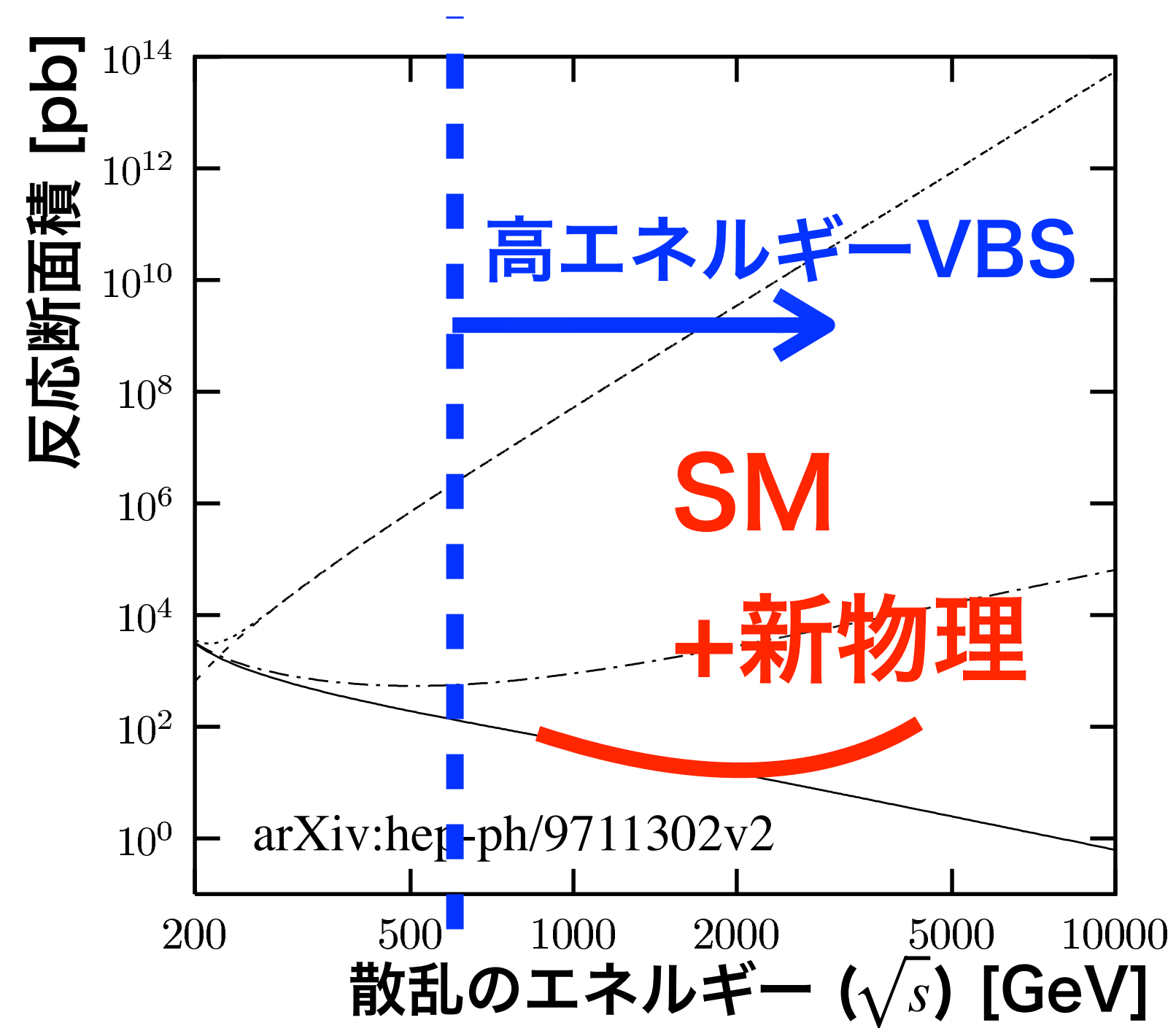
キャンセルしない!

$$A \sim g^2 \frac{E^2}{M_W^2} \quad \longleftrightarrow \quad \text{キャンセル!} \quad A \sim -g^2 \frac{E^2}{M_W^2}$$

BSM



重たい粒子など



高エネルギーVBSの観測で
多くの新物理を探索可能

→ 課題は事象数の確保

VBSの測定の意味: ヒッグス粒子の役割の検証 & 新物理の網羅的な間接探索

LHC/ATLAS実験

VBSを直接測定できる唯一の装置

LHC : Large Hadron Collider

ATLAS 実験

世界最大の円形 pp 加速器 (周長27km)
衝突エネルギーは最大14TeV(現在13TeV)

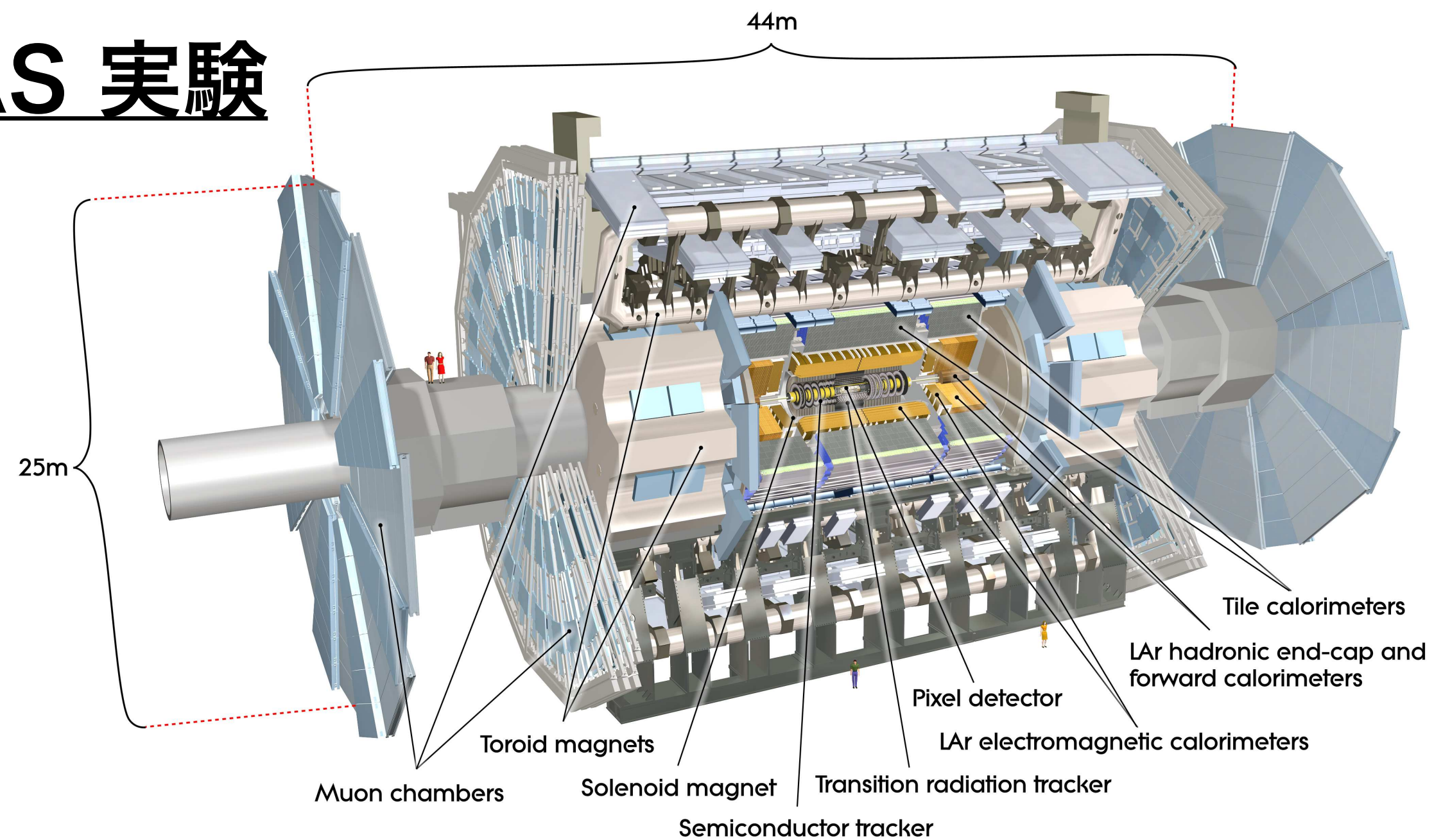
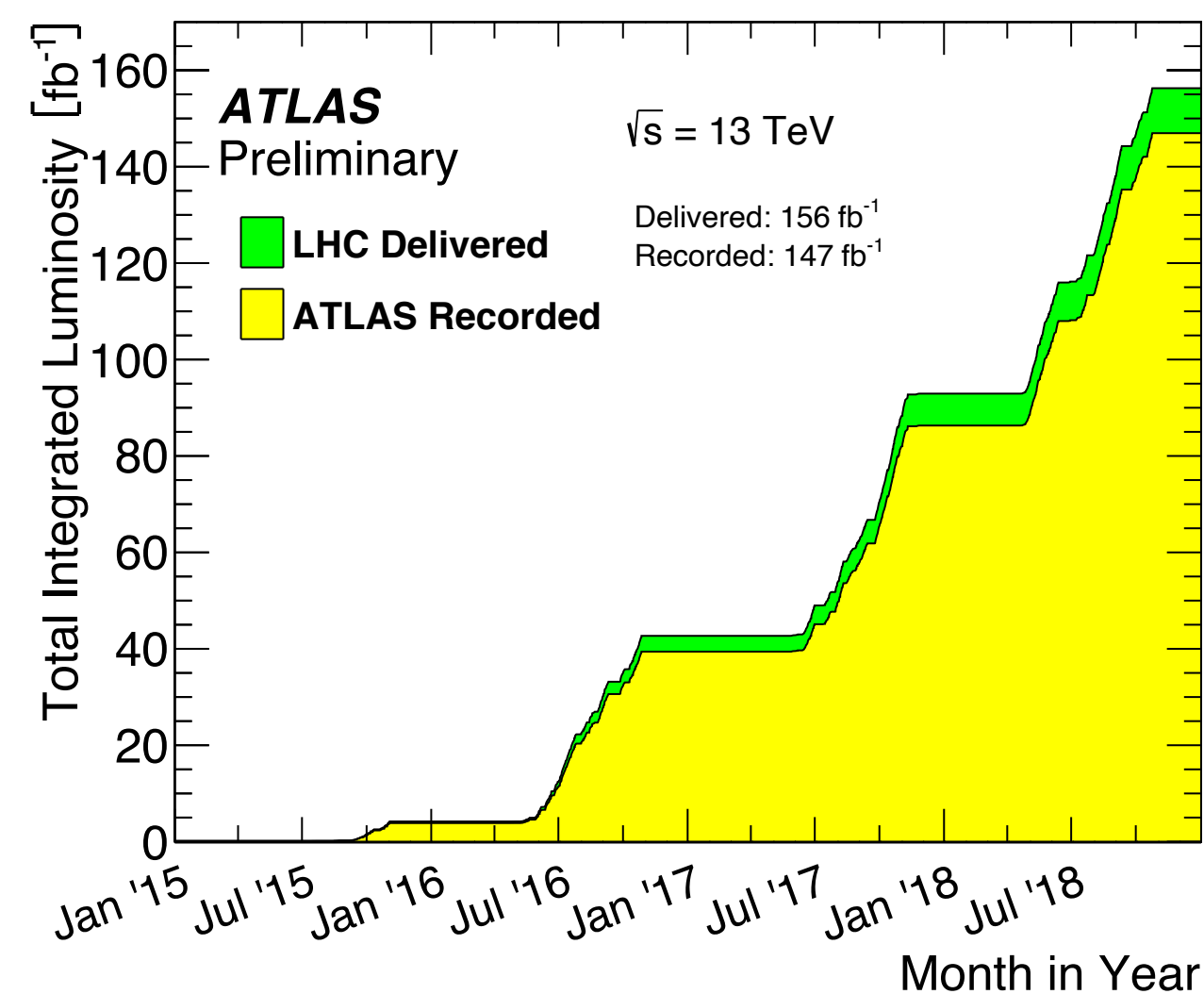


Image: Maximilien Brice/CERN



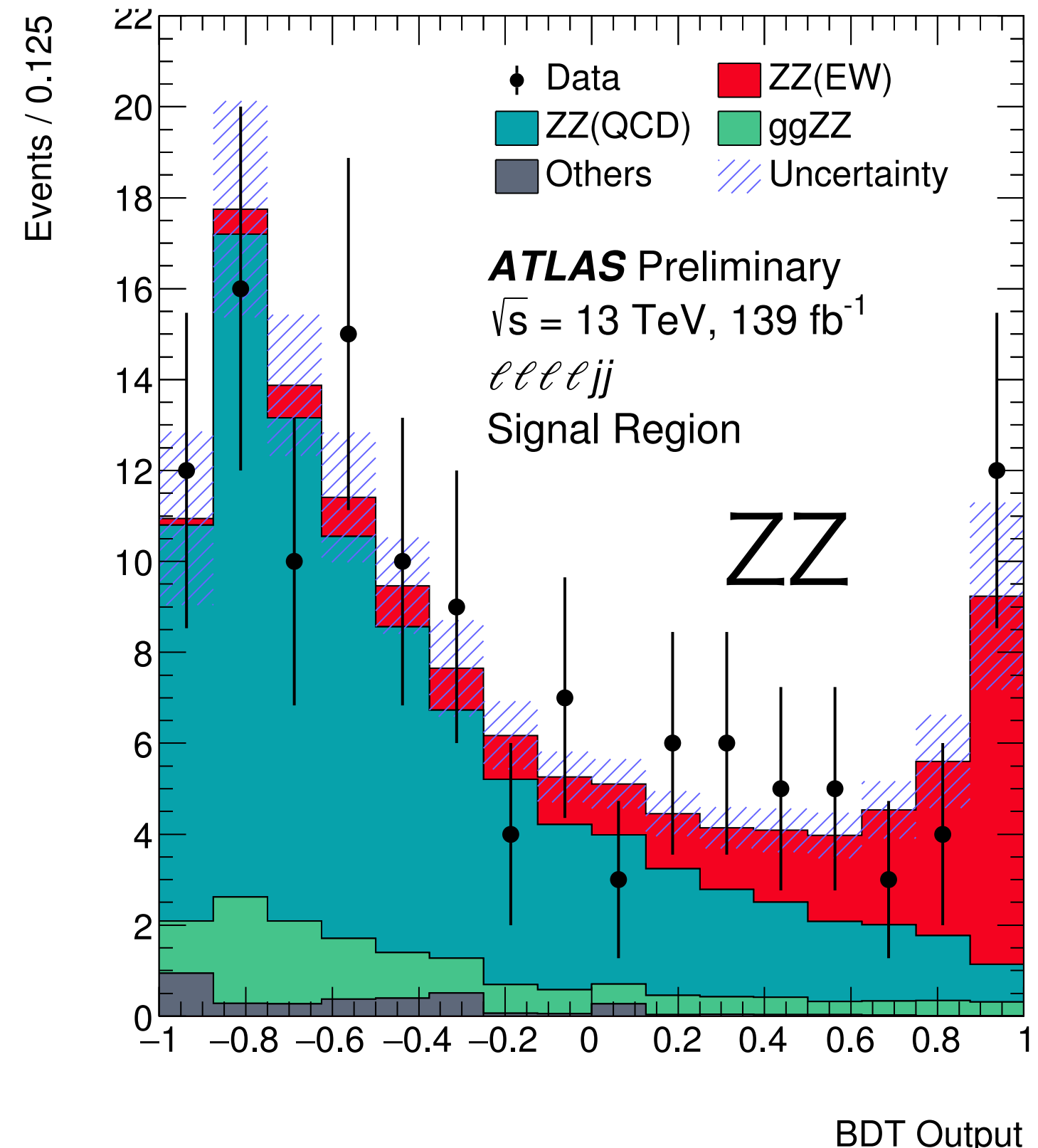
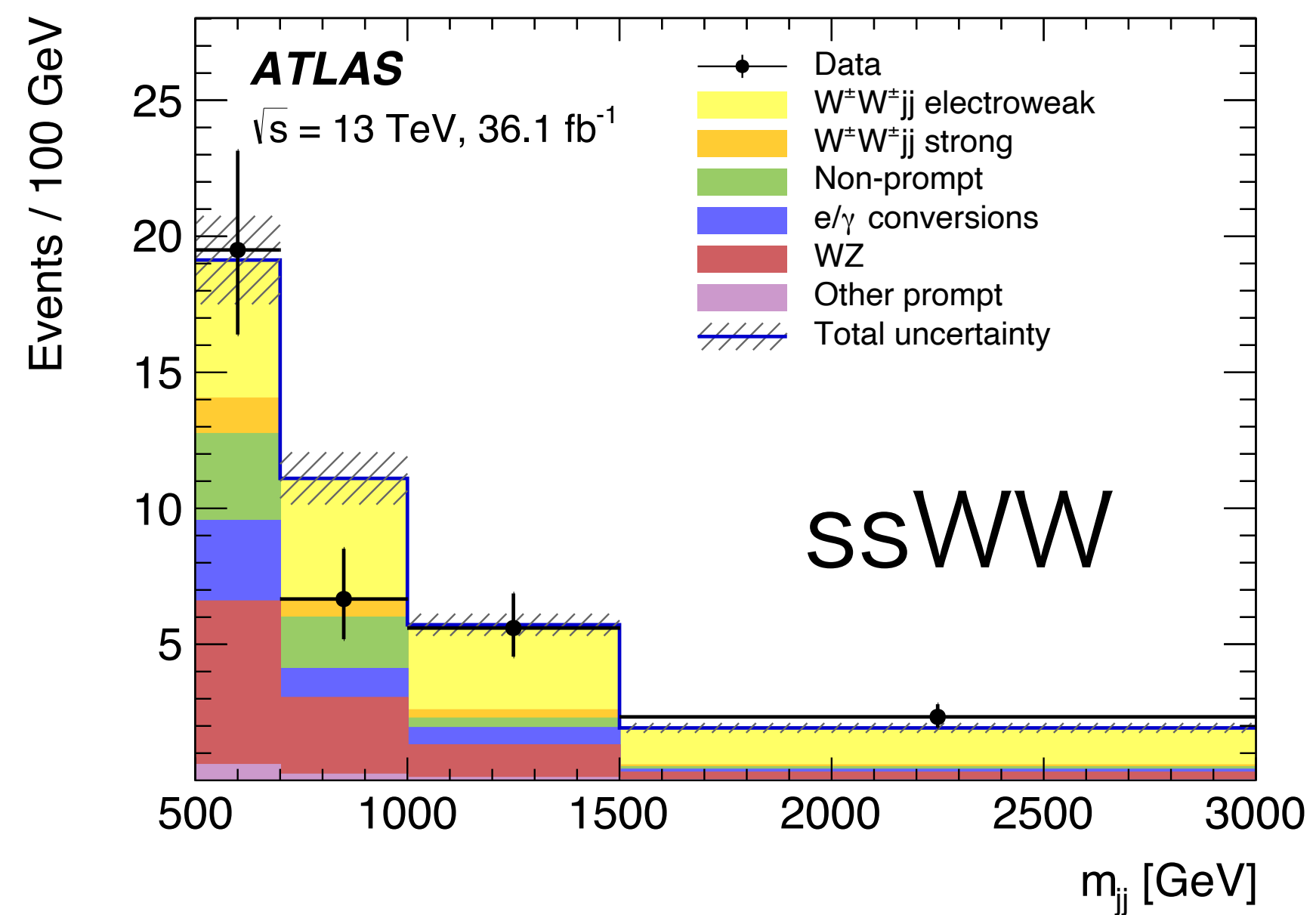
2015-18で
140/ fb を取得
今回の解析は
36/ fb を使用

VBSの探索現状

過程	ATLAS	CMS
ssWW → lνlν (同符号WW)	6.9σ	5.5(5.7)σ
osWW (異符号WW)	-	-
WZ → lνll	5.7(3.3)σ	1.9(2.7)σ
ZZ → ll ll / ll νν	5.5(4.3)σ	2.7(1.6)σ
semileptonic ννqq / lνqq / llqq	本解析	-
full-hadronic qqqq	背景事象多く困難	-

背景事象少

背景事象大

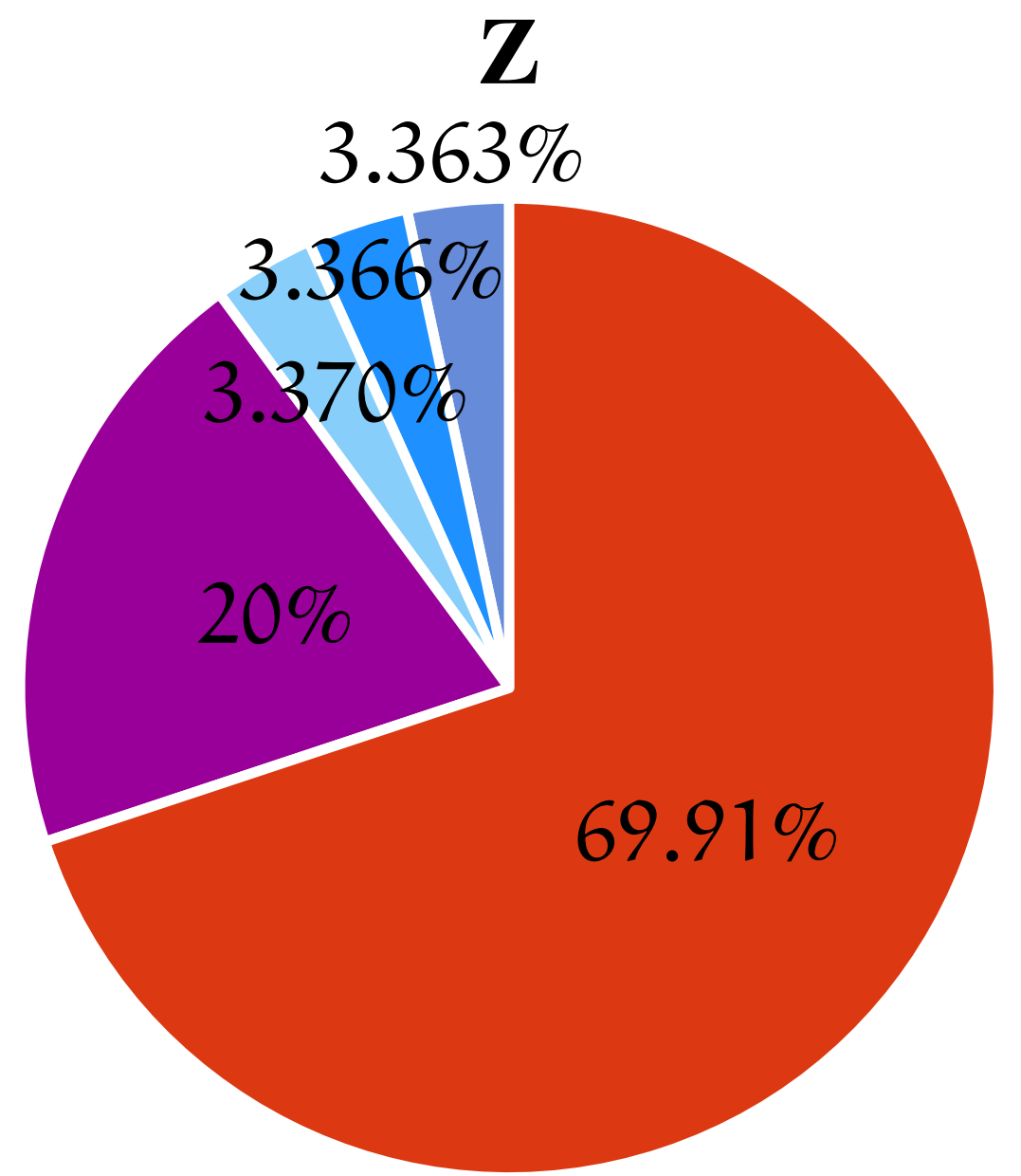
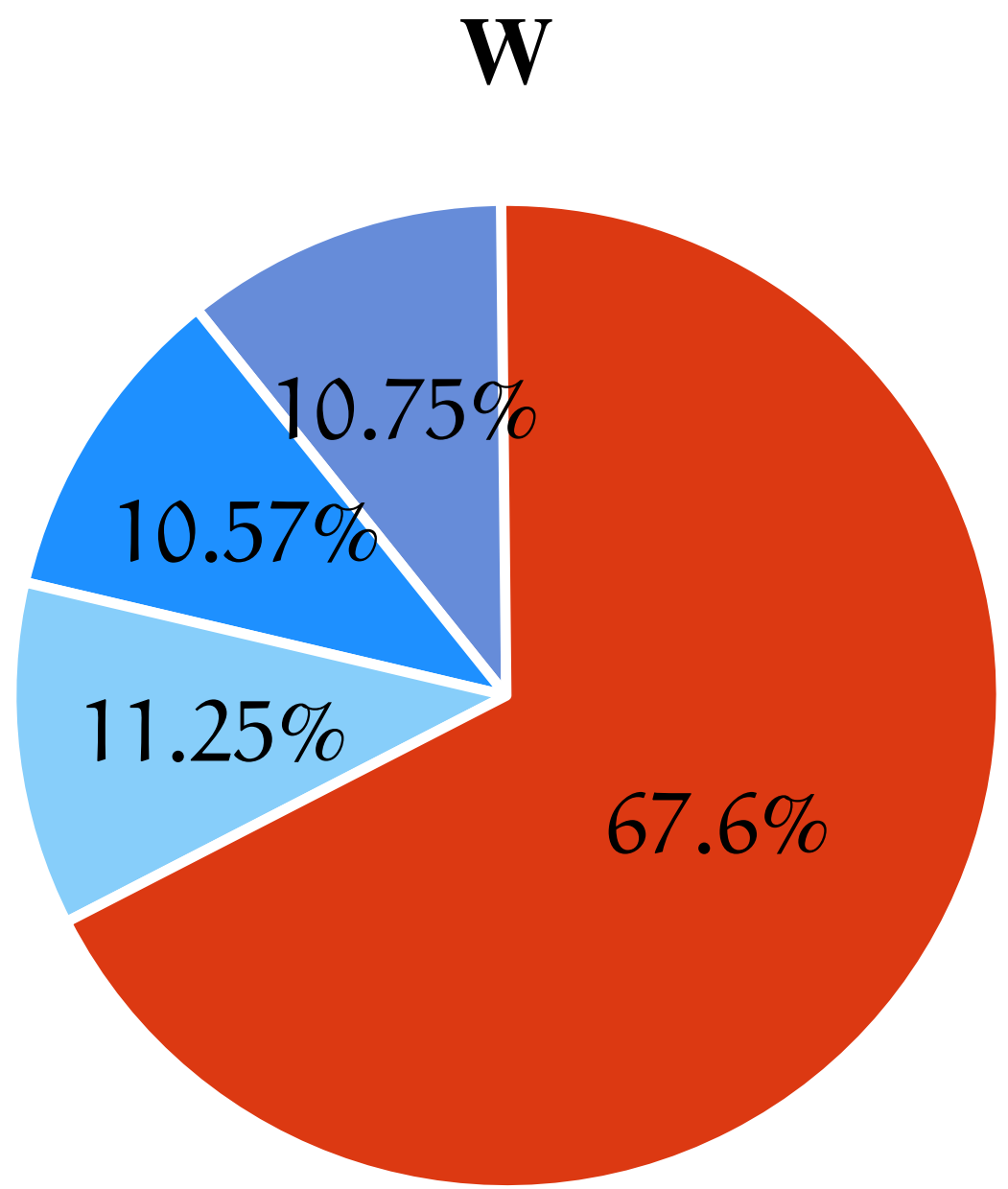


VBSの生成断面積・崩壊分岐比

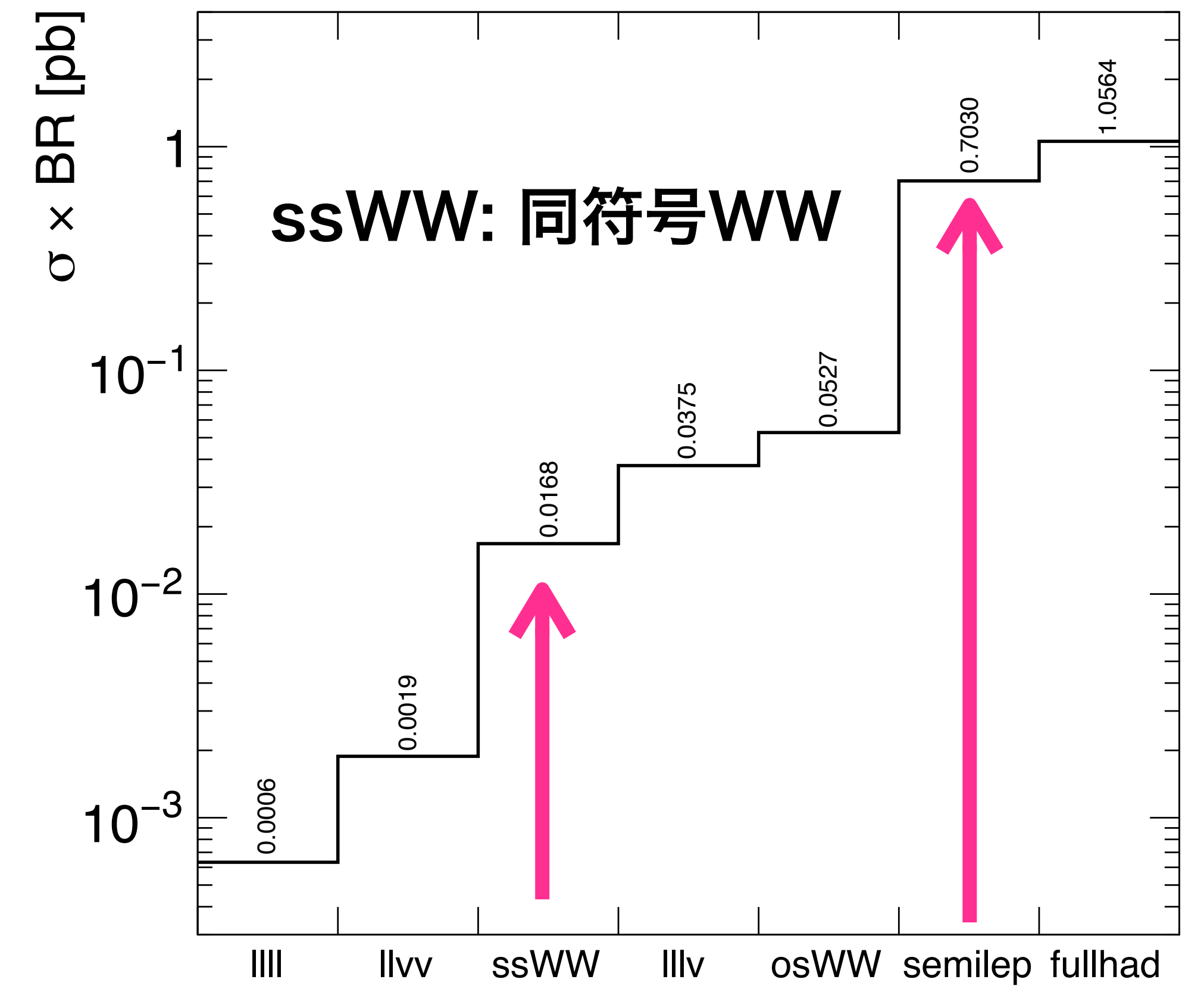
生成断面積→

↓ W/Z崩壊分岐比

過程	断面積[pb]
ssWW	0.36
osWW	1.13
WZ	0.65
ZZ	0.14



- $e\nu/ee$
- $\mu\nu/\mu\mu$
- $\tau\nu/\tau\tau$
- $\nu\nu$
- qq

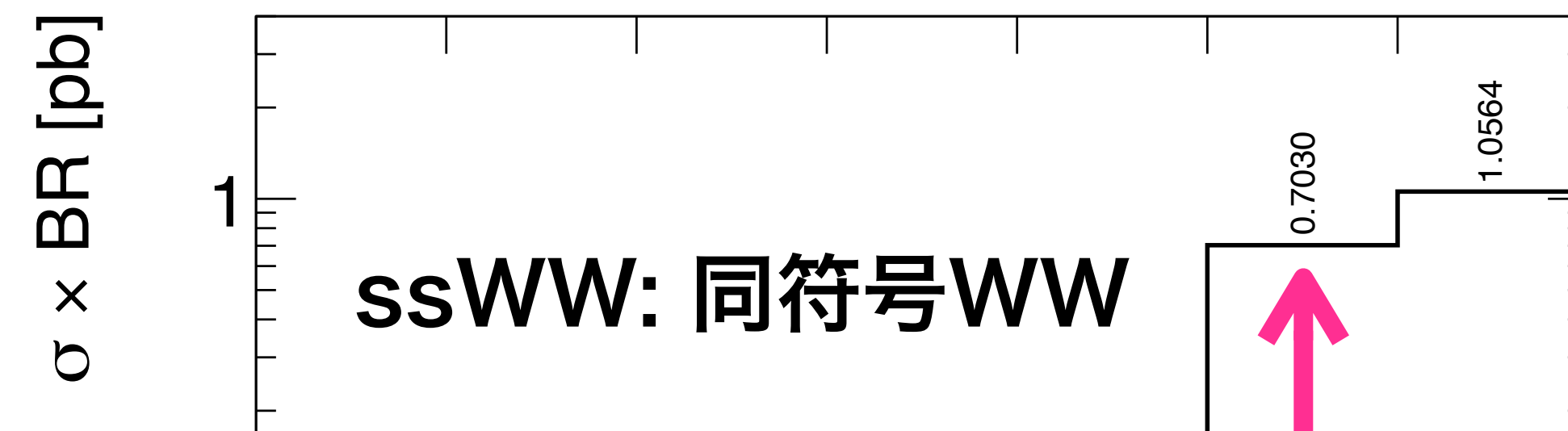


発見チャネル ssWWに比べ semileptonic は40倍の事象数

VBSの生成断面積・崩壊分岐比

生成断面積→

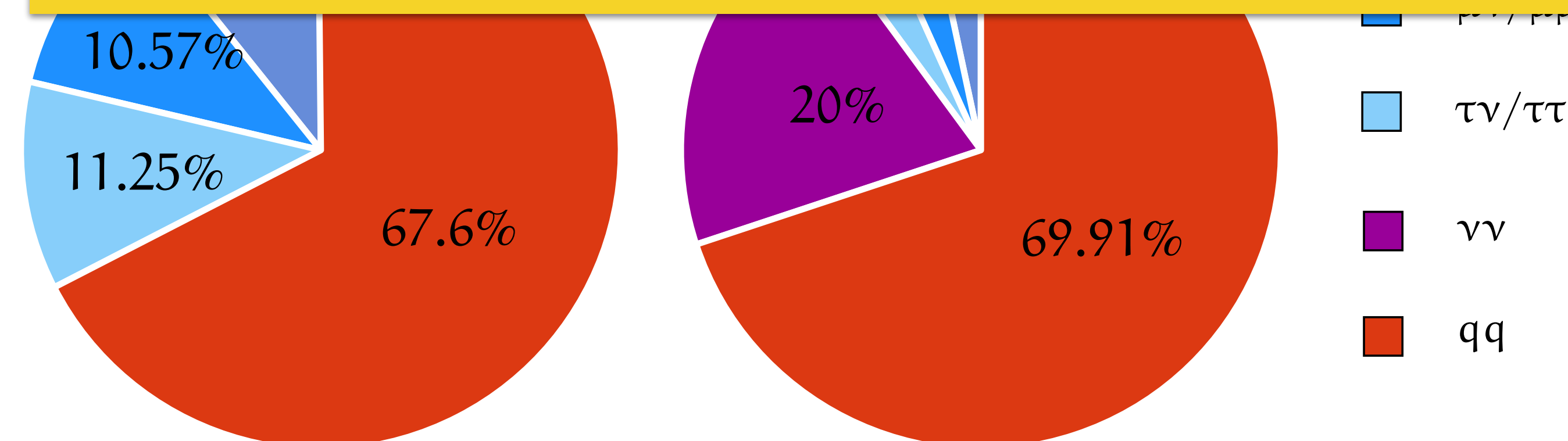
過程	断面積[pb]
ssWW	0.36
osWW	1.13
WZ	0.65



高エネルギーVBS領域が標準模型の検証 & 新物理探索の観点から面白い

ATLAS実験の2015, 2016年データを用いて

Semileptonic終状態を用いた標準模型VBSの初測定 & 最高感度の新物理探索

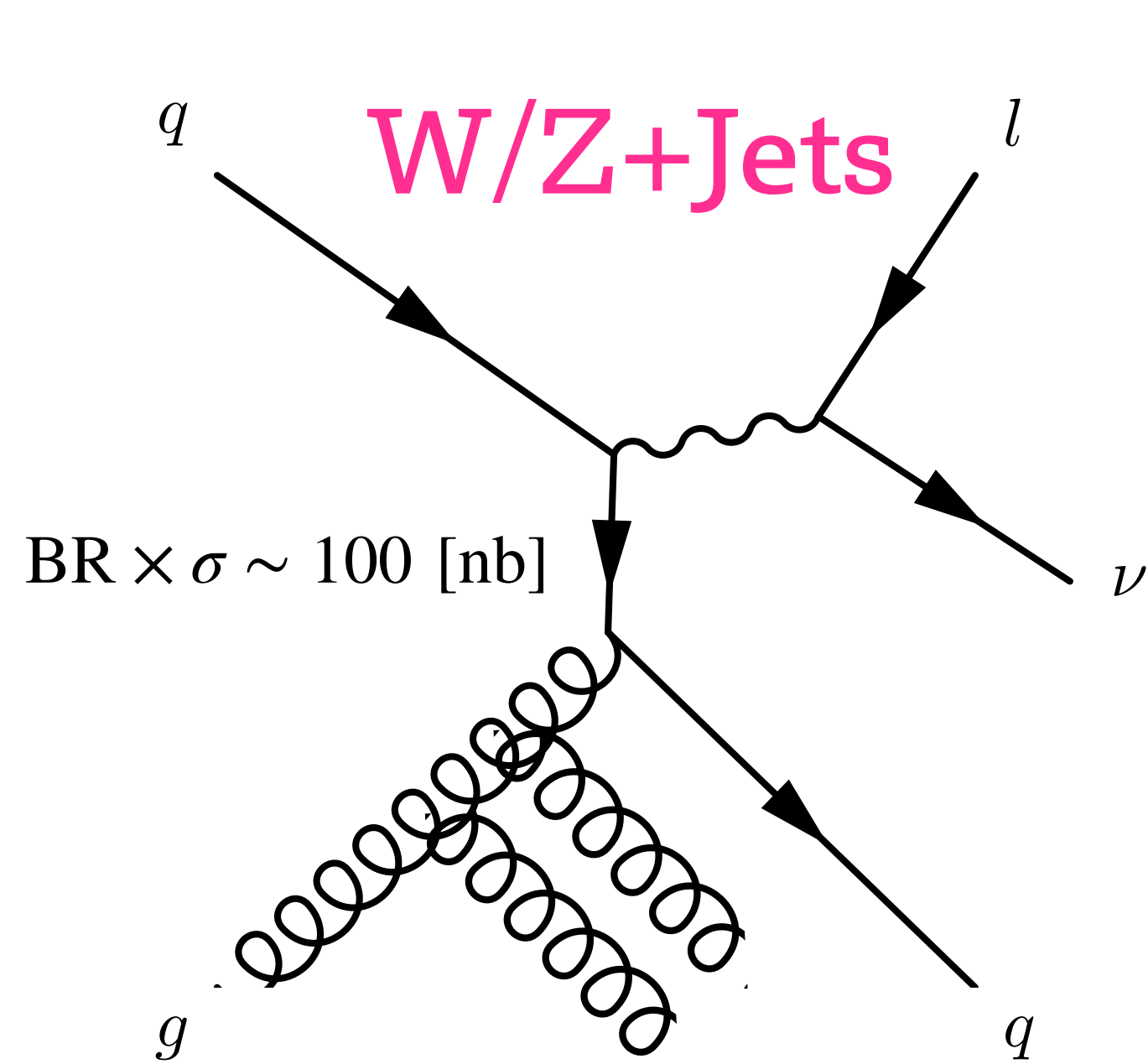
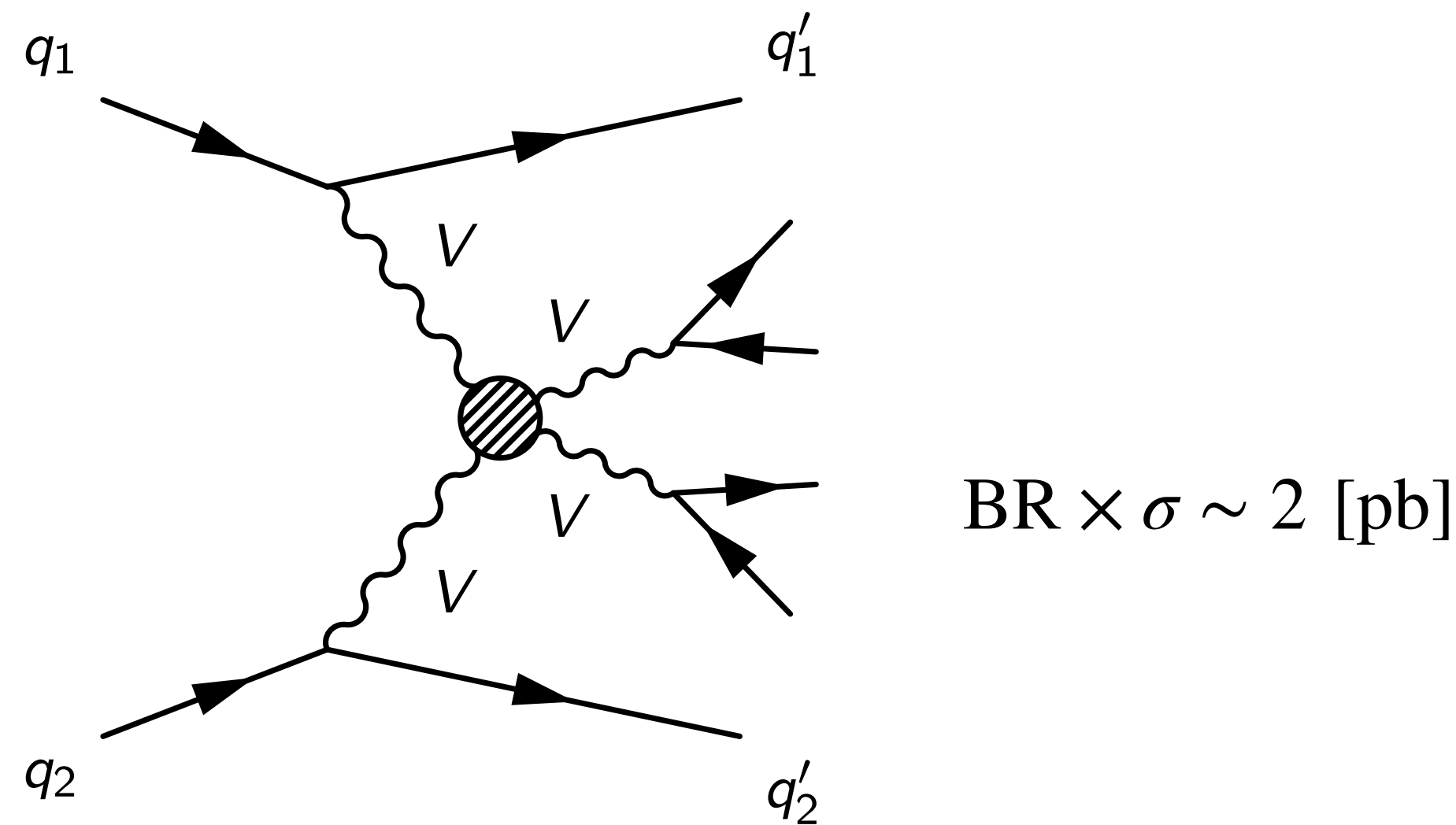


発見チャンネル ssWWに比べ
semileptonic は40倍の事象数

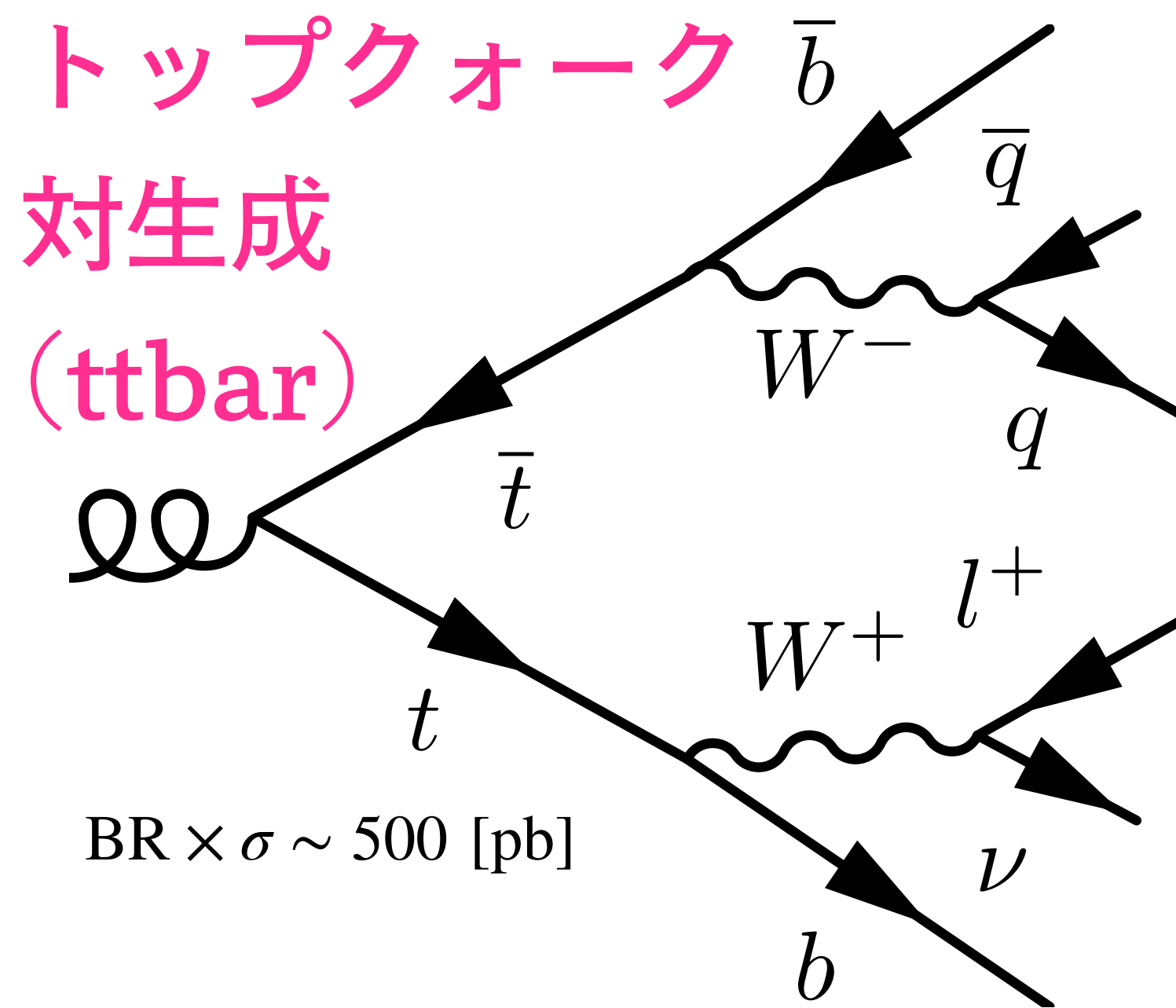
信号と背景事象

EW VBS

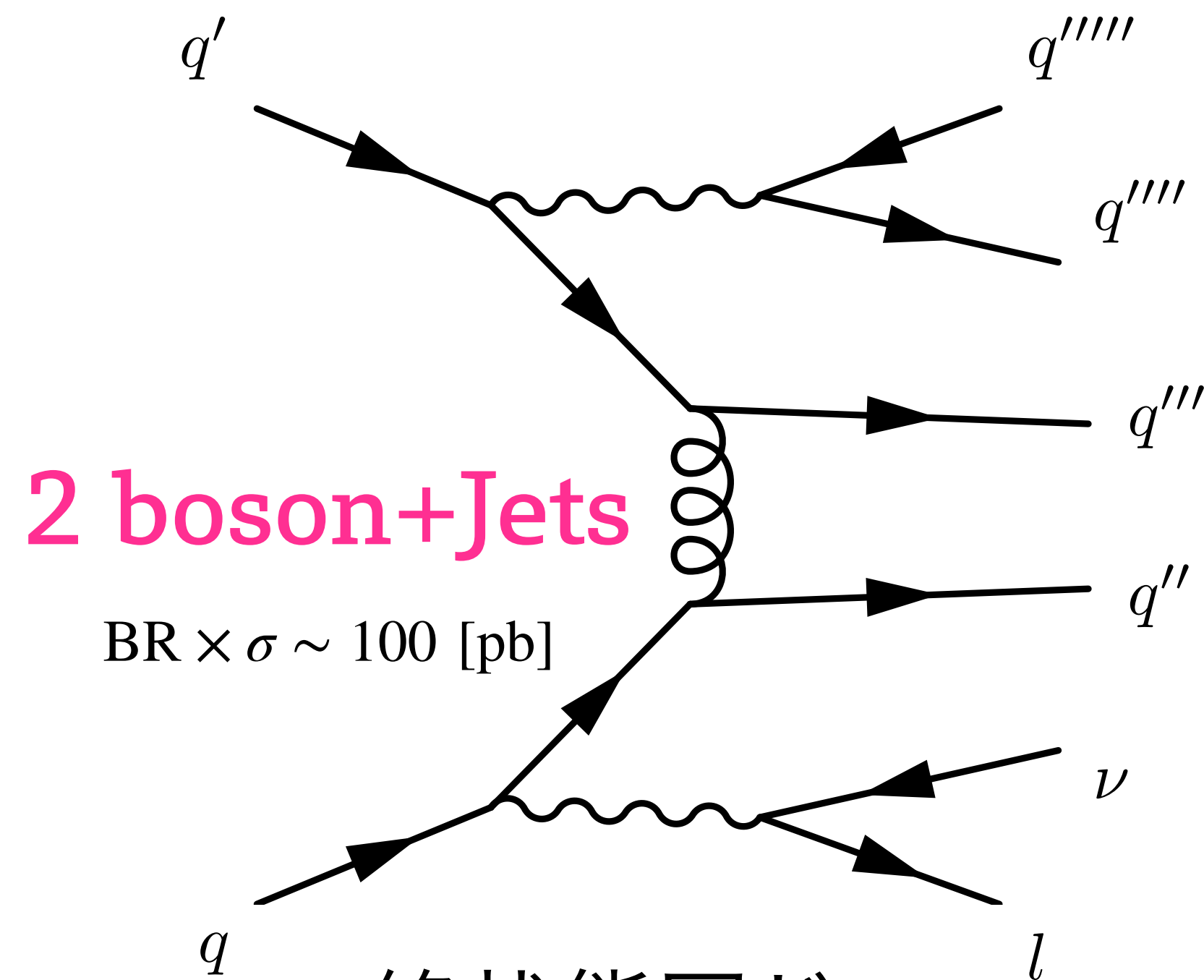
- 検出器前方に飛ぶ2つのクォーク
- ハドロン/レプトン崩壊するボソン



終状態違うが断面積大



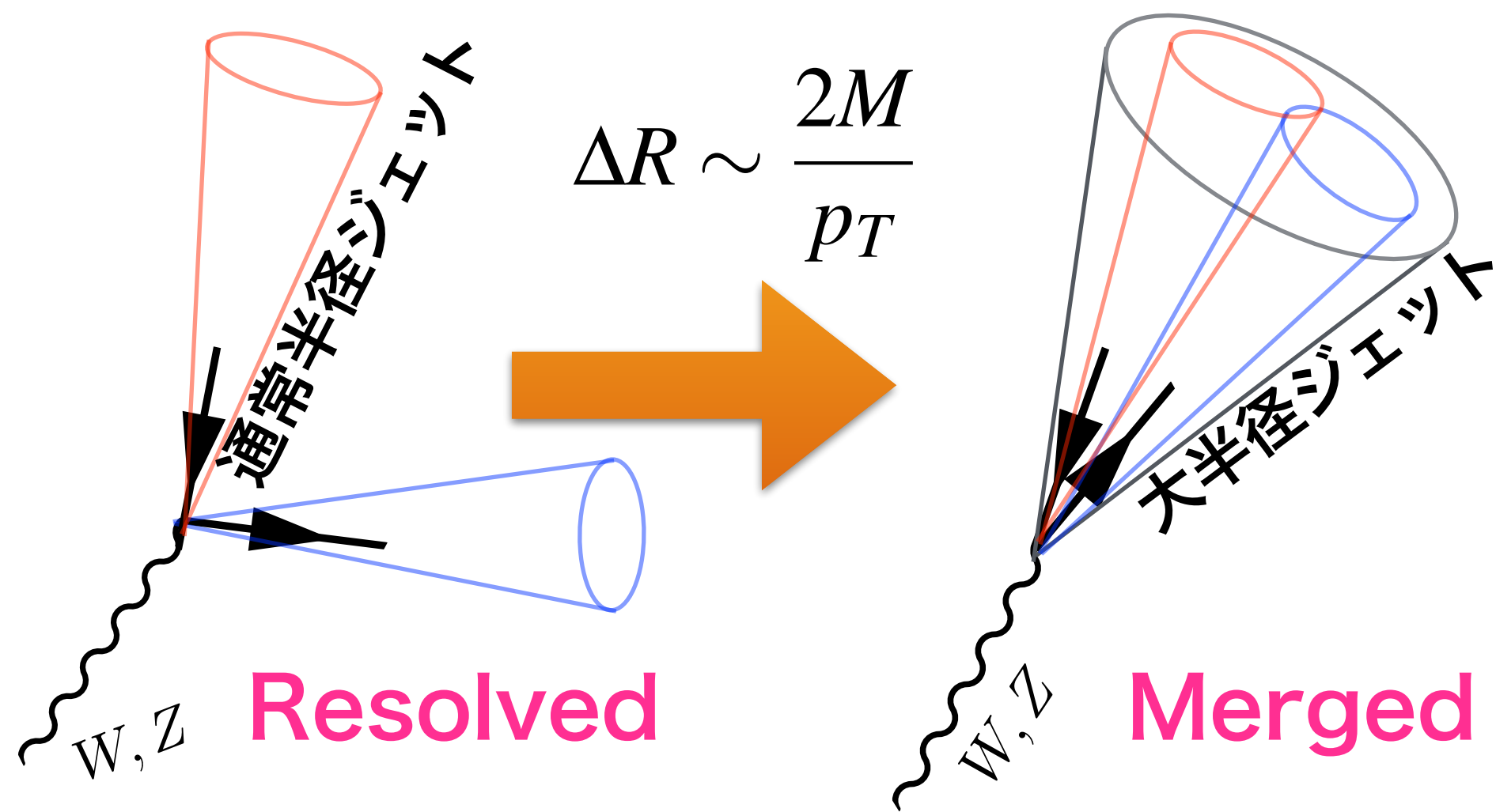
終状態同じ。



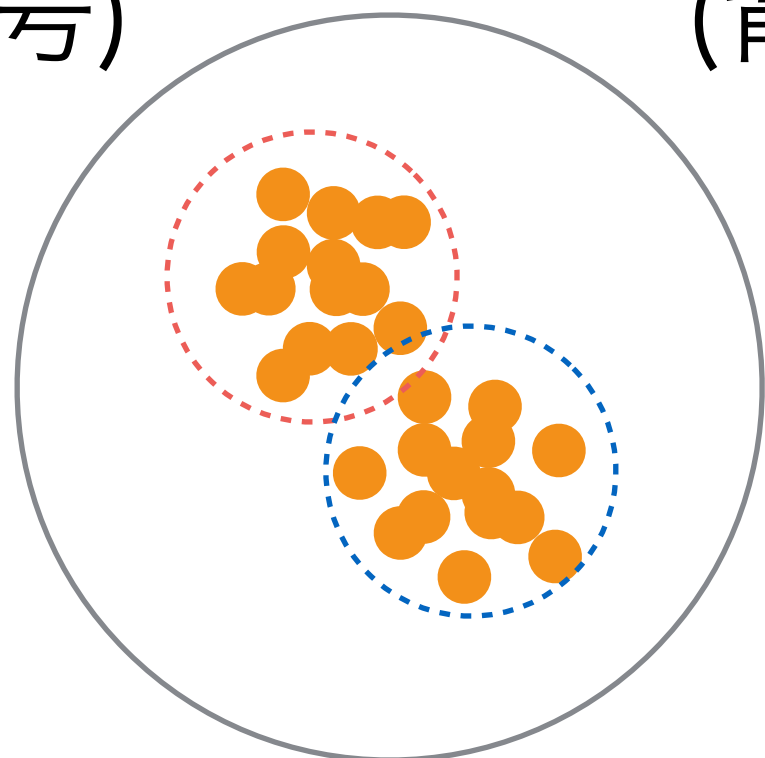
終状態同じ。

Boosted W/Z tagging

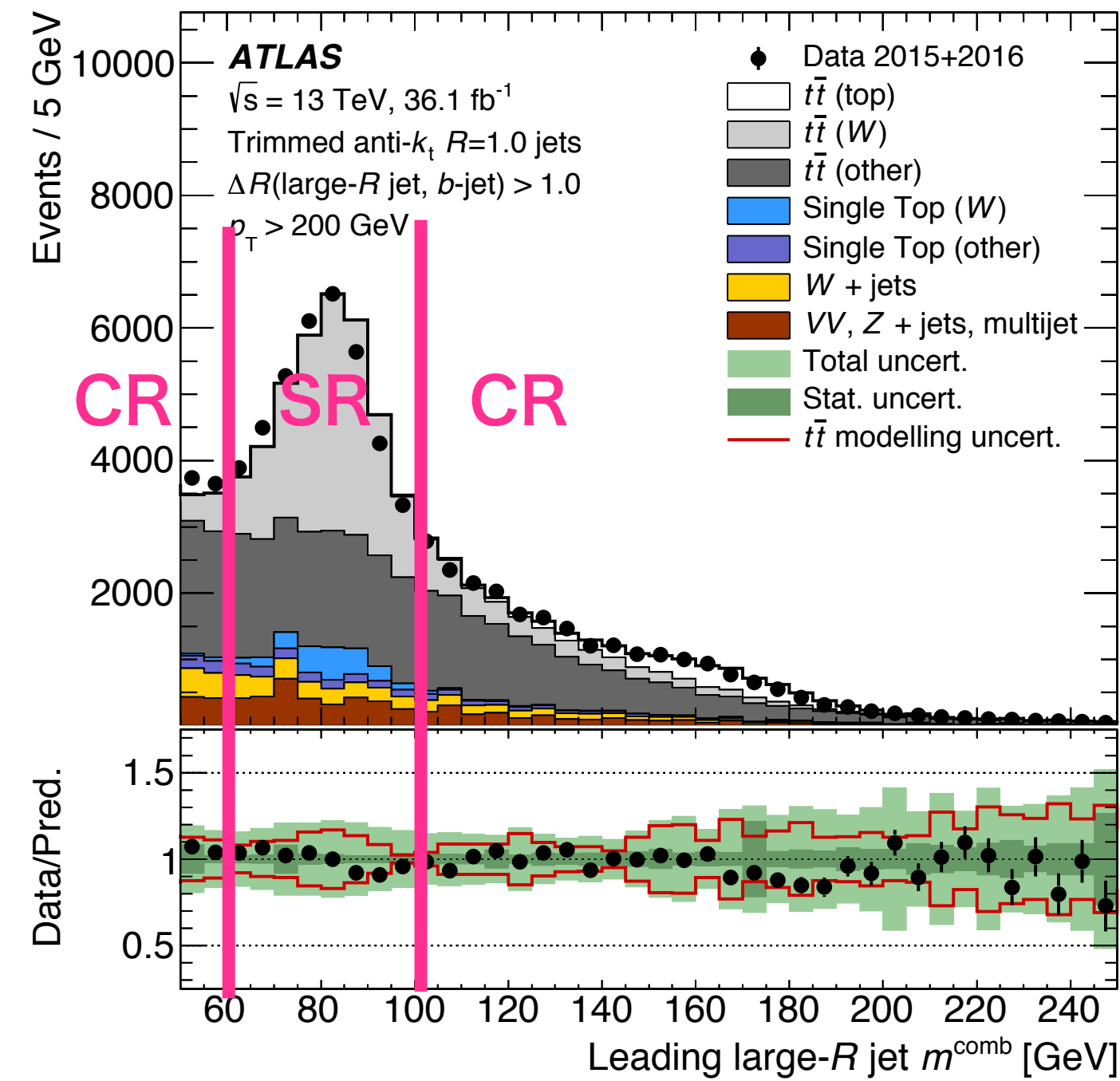
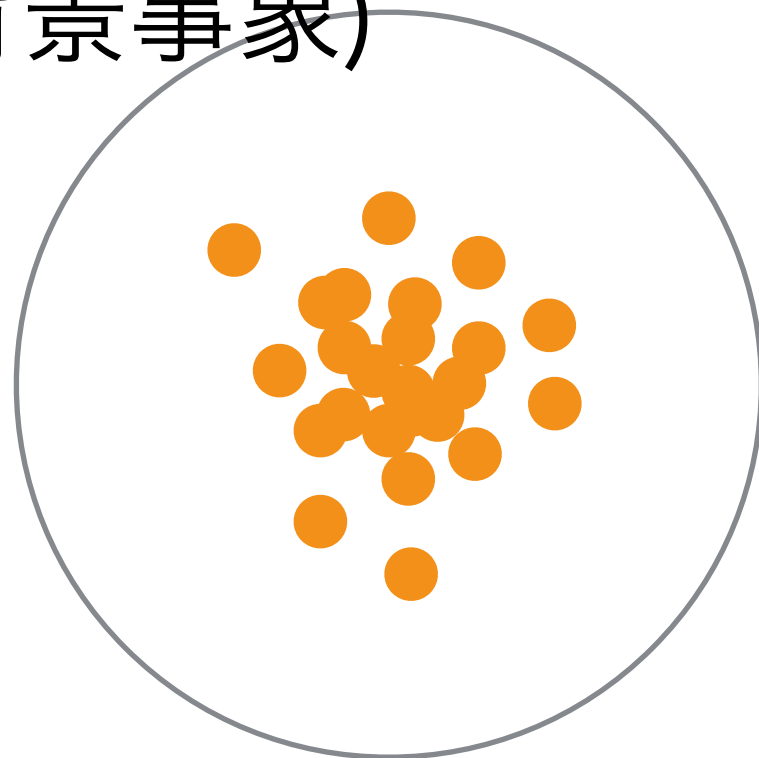
高い $\sqrt{s} \Rightarrow$ 高運動量 $W/Z \rightarrow qq$



W/Z Jet (信号)



q/g Jet (背景事象)

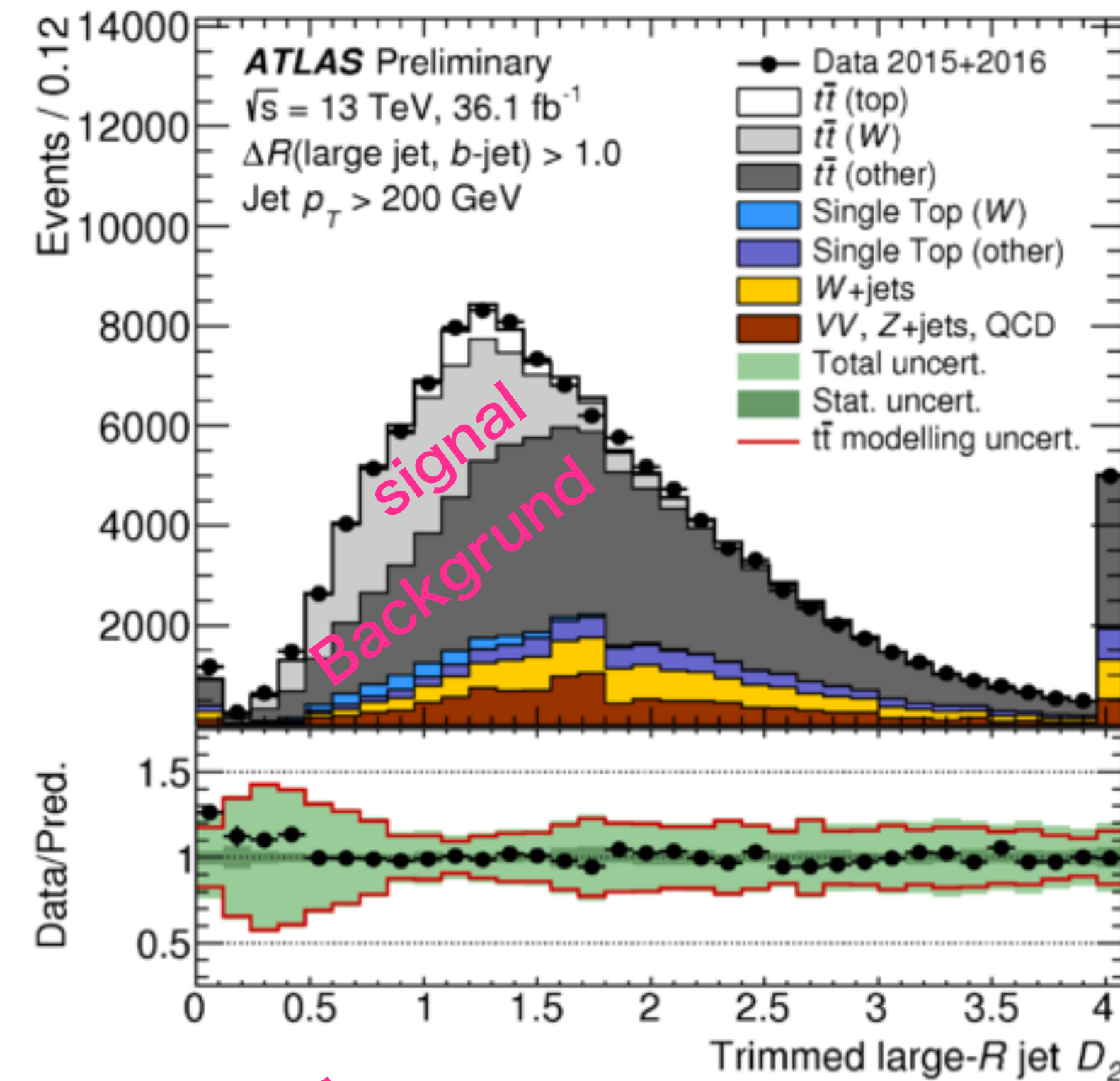


$$D_2 = \frac{e_3^\beta}{(e_2^\beta)^3}$$

$$e_2^\beta = \frac{1}{p_{T\text{jet}}^2} \sum_{i < j}^{N_{\text{cl}}} p_{Ti} p_{Tj} \Delta R_{ij}^\beta$$

$$e_3^\beta = \frac{1}{p_{T\text{jet}}^3} \sum_{i < j < k}^{N_{\text{cl}}} p_{Ti} p_{Tj} p_{Tk} \Delta R_{ij}^\beta \Delta R_{jk}^\beta \Delta R_{ki}^\beta$$

← ジェット質量と $\downarrow D_2$ の2次元でボソンを同定



事象選択

0. 前方ジェット対不変質量

$m_{jj} > 400 \text{ GeV}$ でカット

1. W/Z運動量で Resolved/Merged

2. 荷電レプトン数で分ける

L0: vvqq, L1: lvqq, L2: llqq

3. 純粋なプロセスを抜き出す

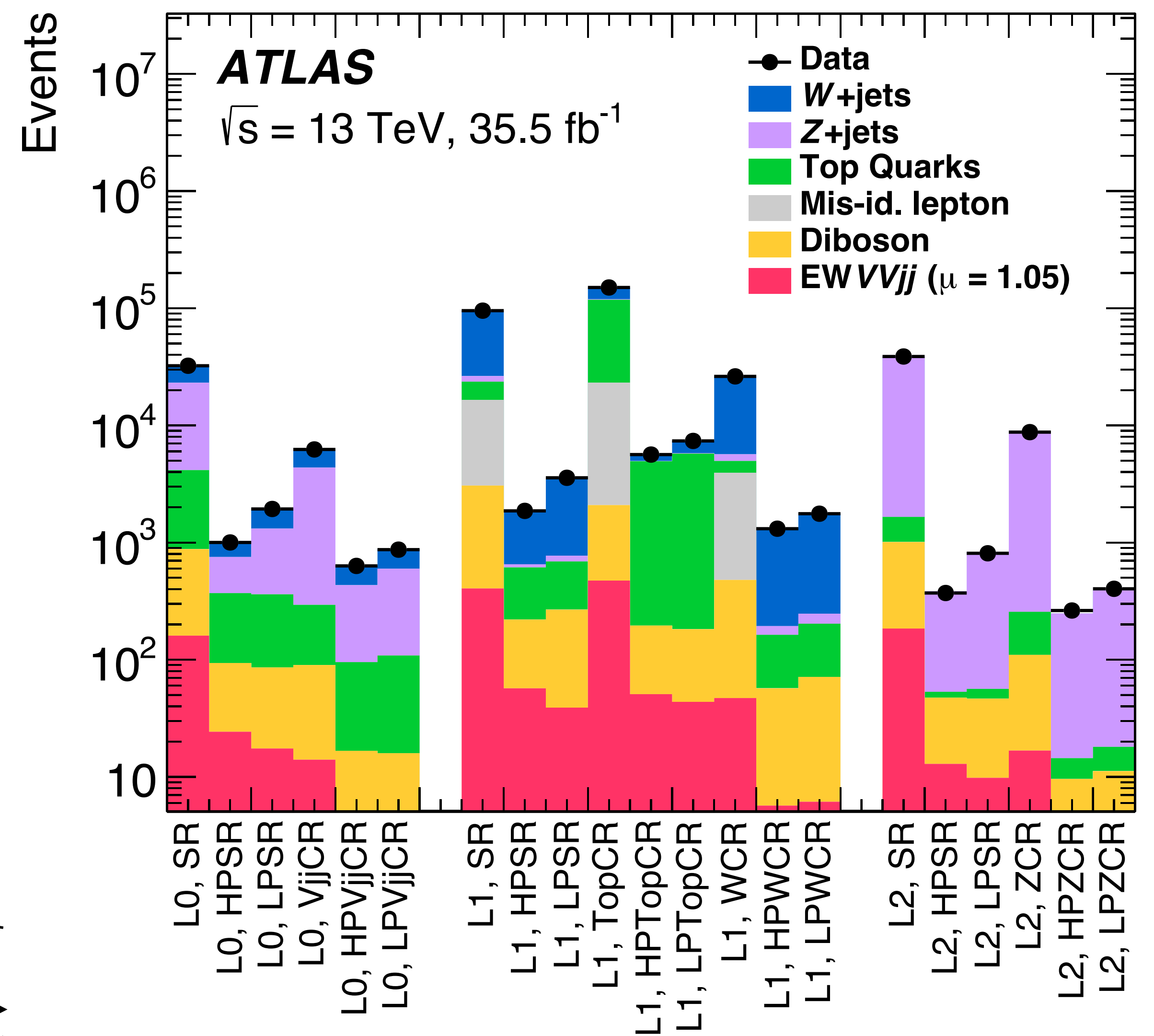
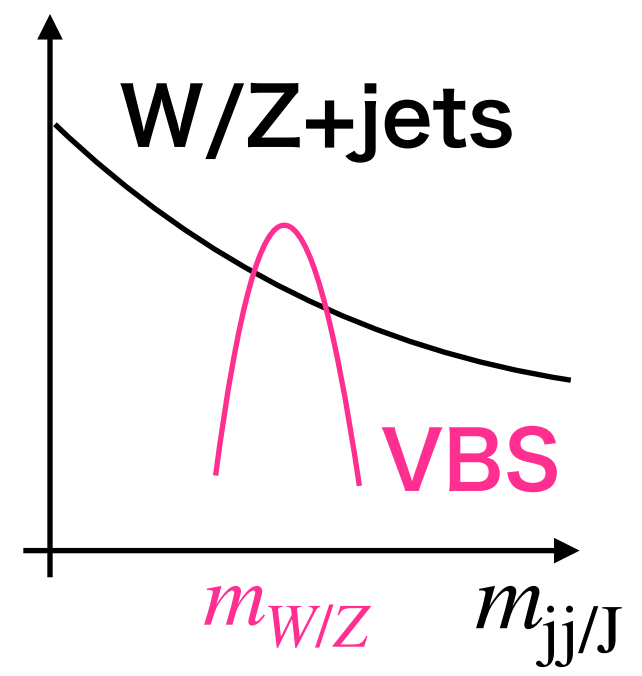
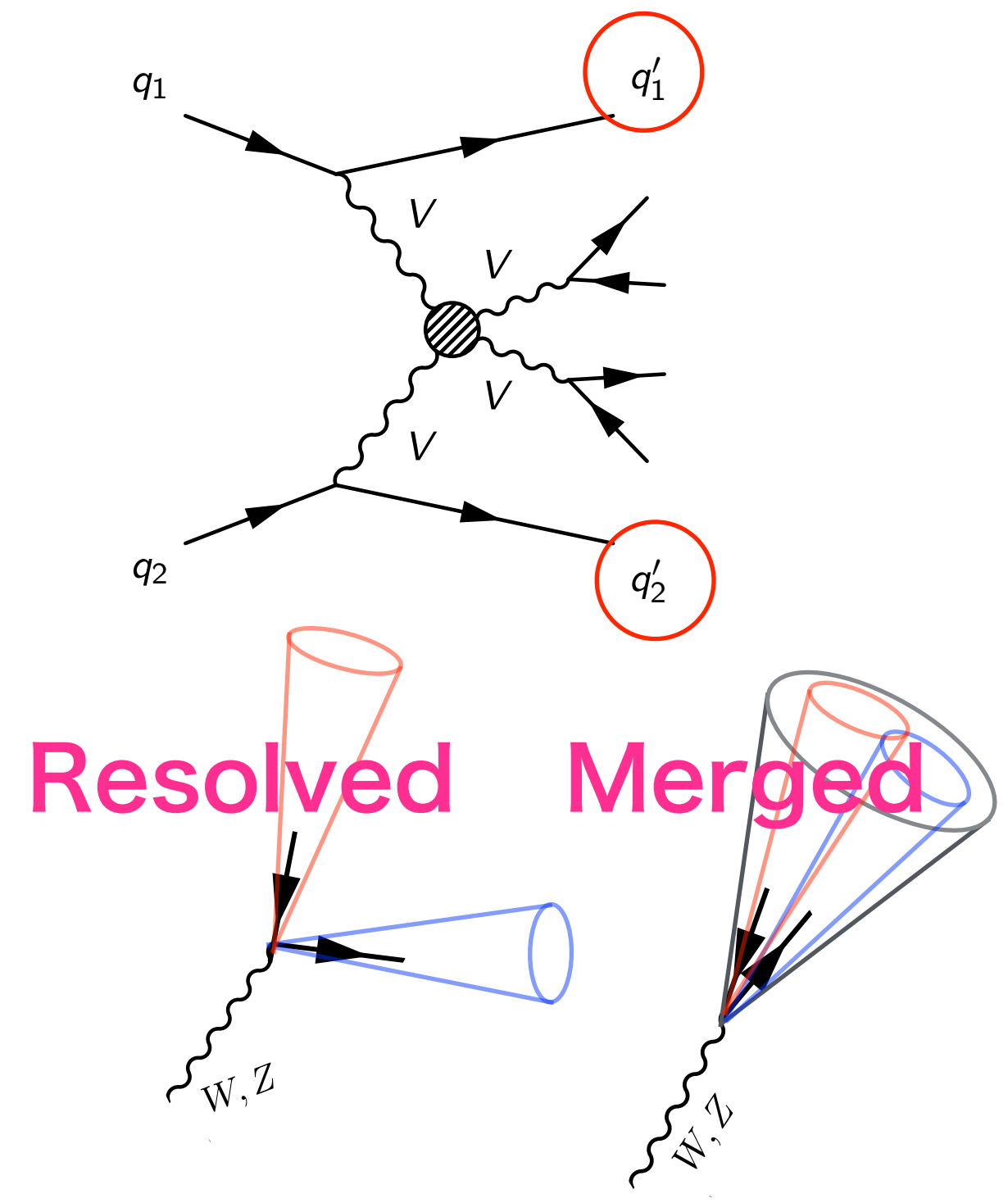
TopCR: bジェットを要求

WCR/ZCR: $|m_{jj/J} - m_{W/Z}| \gtrsim 10 \text{ [GeV]}$

SR: $|m_{jj/J} - m_{W/Z}| \lesssim 10 \text{ [GeV]}$

4. 信号純度を更に高める

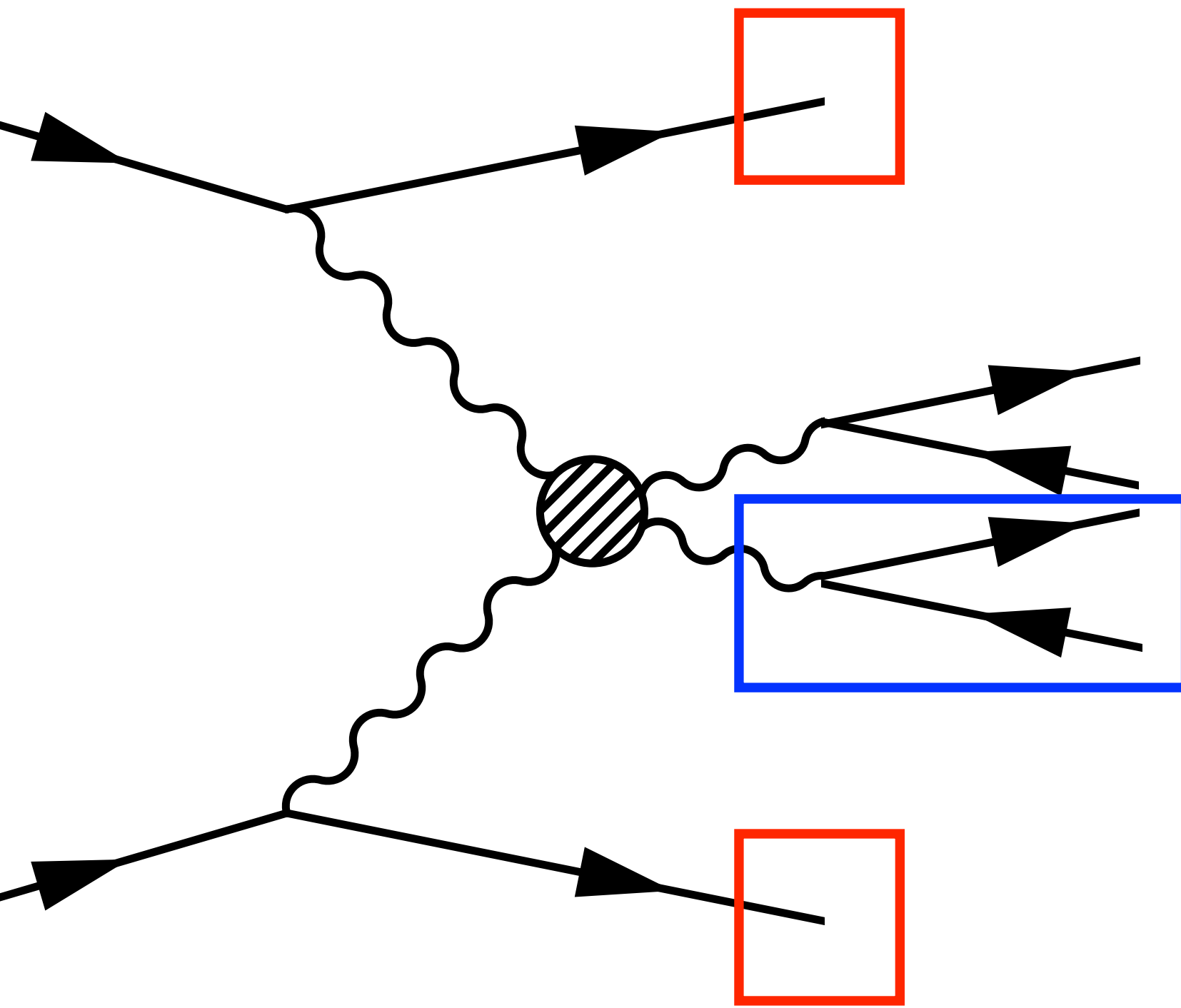
HP: $D_2^{\beta=1} \lesssim 1.5$ **LP:** $1.5 \lesssim D_2^{\beta=1} \lesssim 2.0$



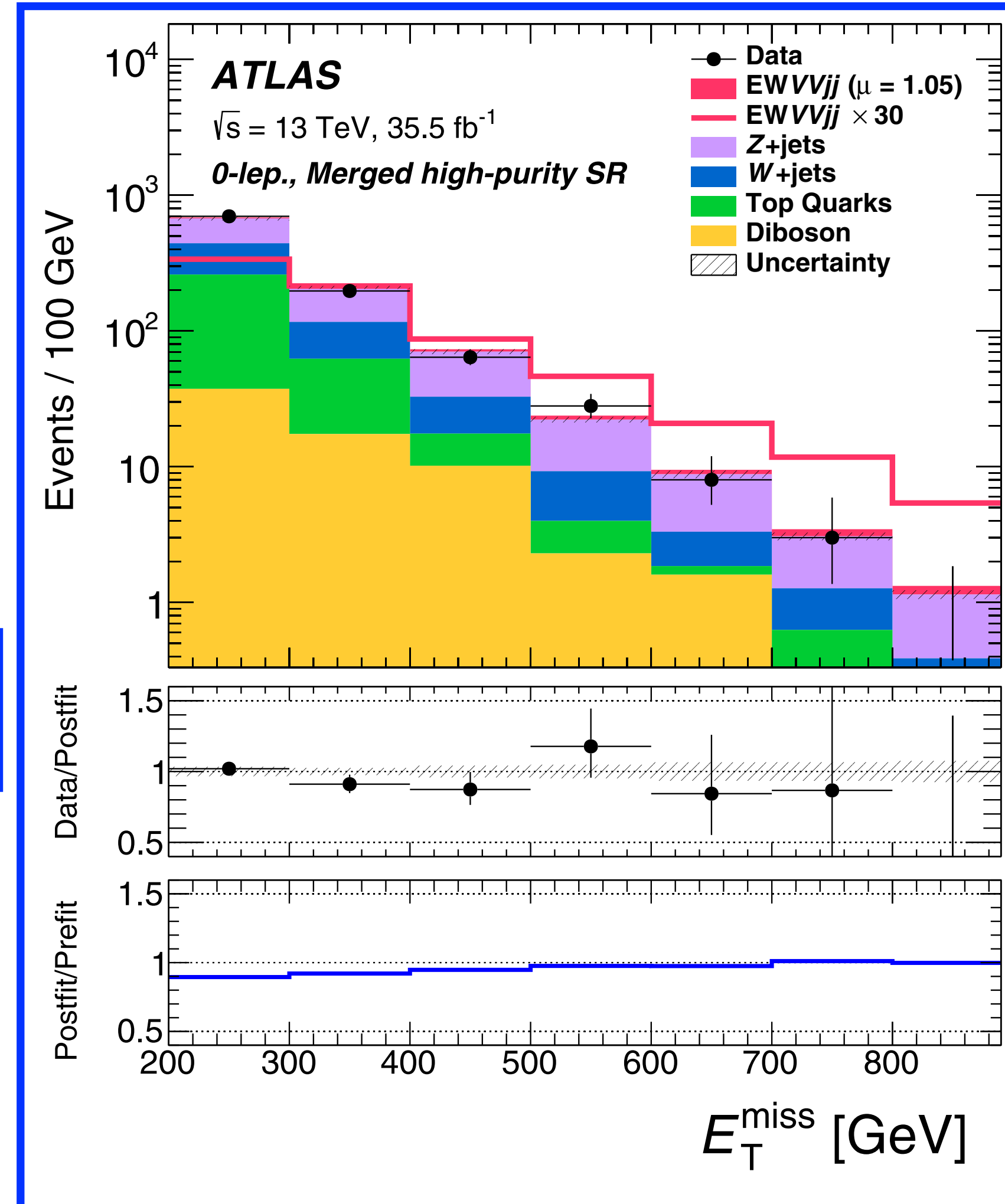
純度の高いコントロール領域が達成されているが、信号領域の背景事象が多い。。。

BDT

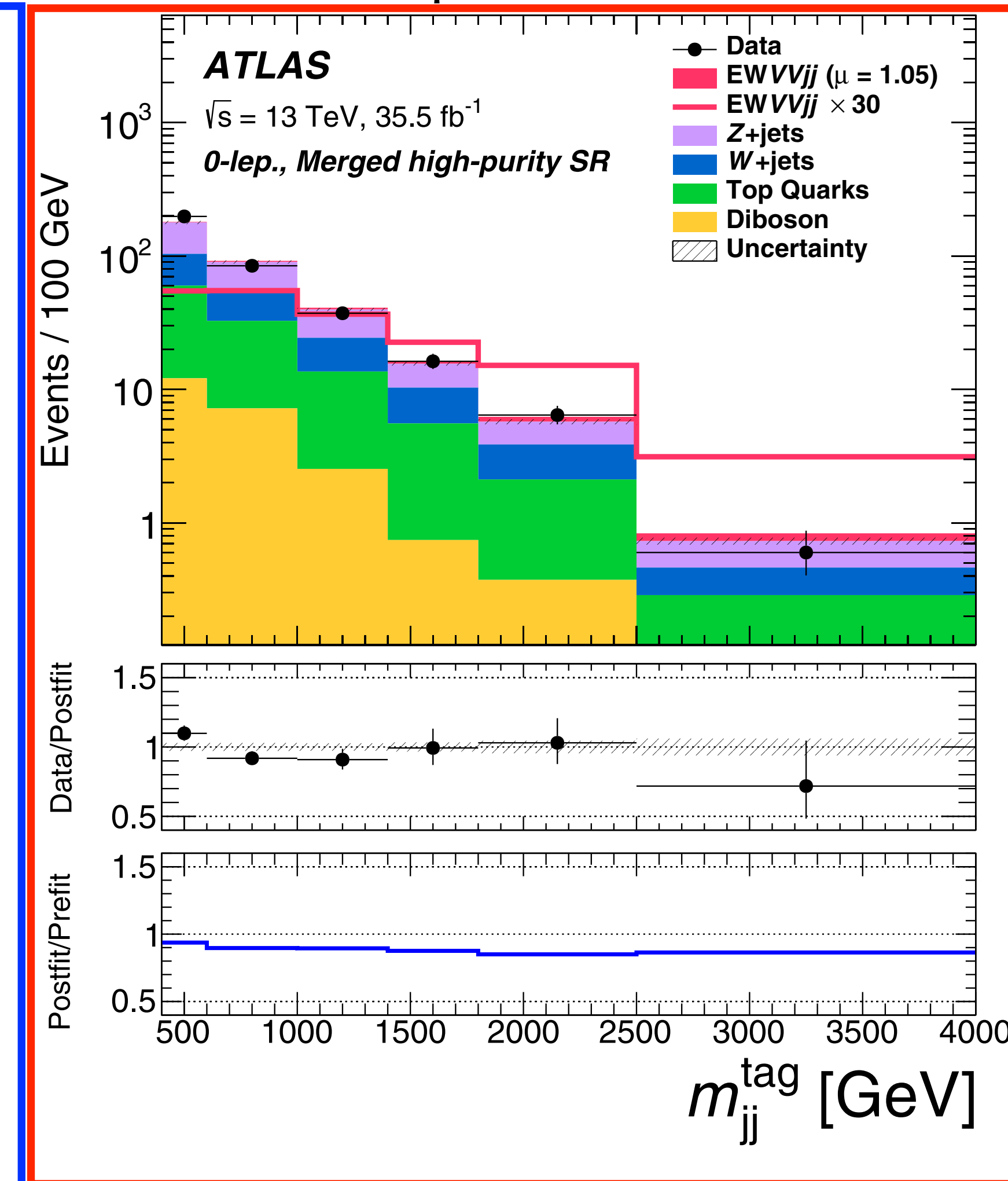
更に機械学習(BDT by TMVA)で信号の特徴を最大限活用する。



ν 由来の消失横運動量



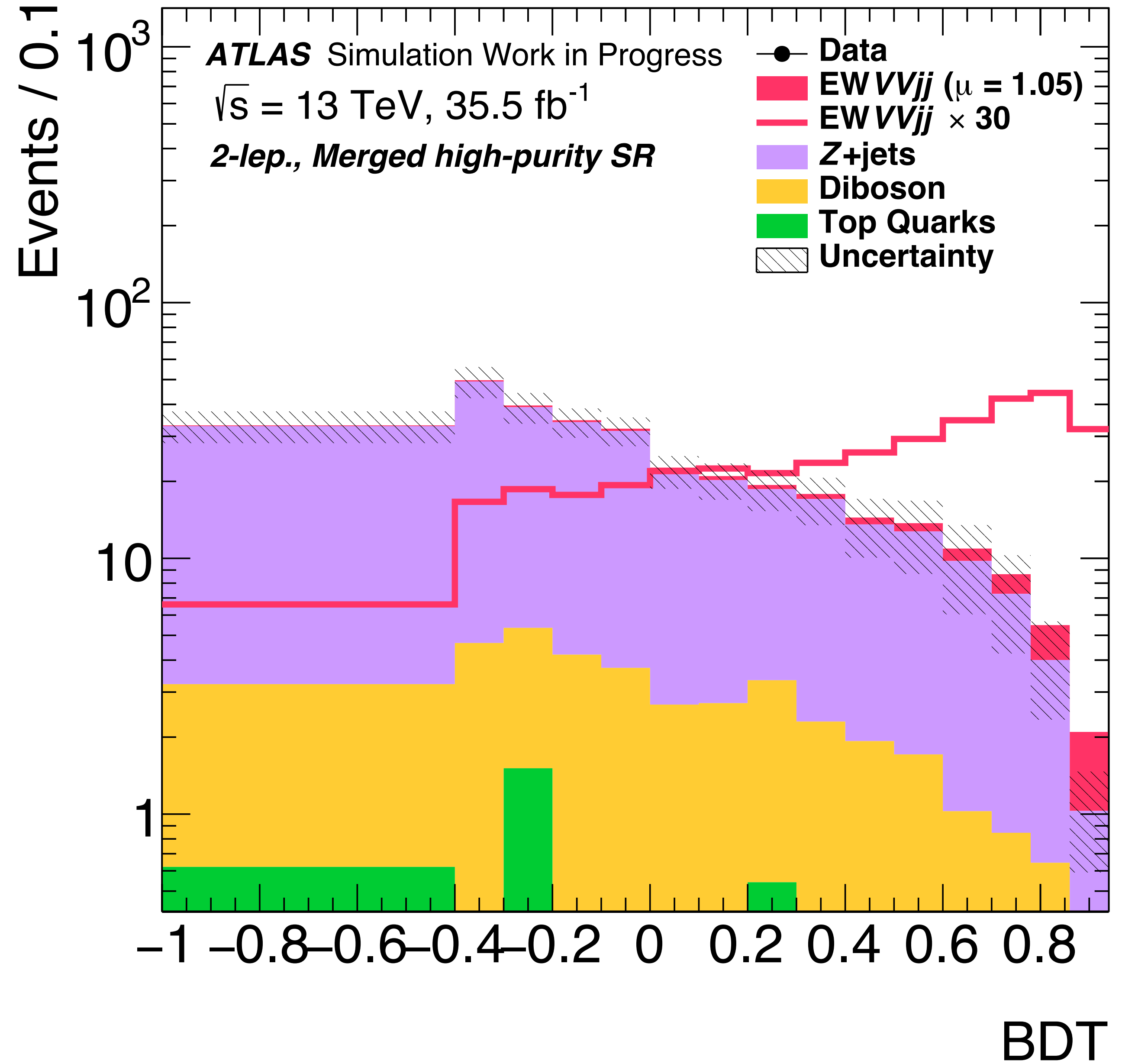
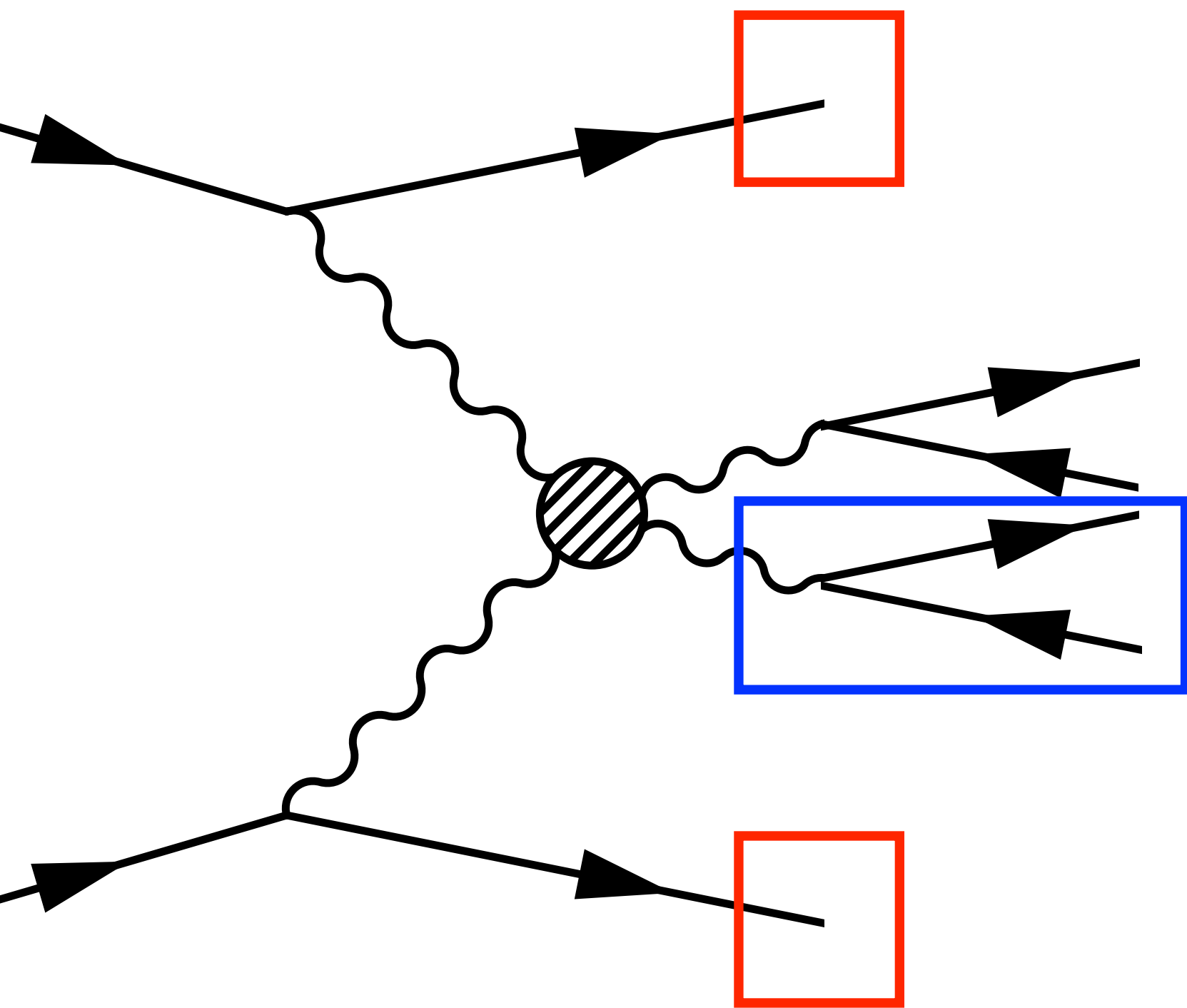
前方quarkの普遍質量



その他10個程度の変数を使用。

BDT

更に機械学習(BDT by TMVA)で信号の特徴を最大限活用する。



同時フィットによる信号強度測定

$$L(\mu, \vec{v}, \vec{\theta}) = \prod_{n_i \in \text{bins}} P(n_i | \mu, \vec{v}, \vec{s}(\vec{\theta}), \vec{b}(\vec{\theta})) \times G(\vec{\theta} | \vec{\theta}_0) \quad \begin{array}{l} \text{P: poisson分布} \\ \text{G: gauss分布} \end{array}$$

μ : sig. normalization scale (信号強度)

\vec{v} : bkg. normalization scale

$\vec{\theta}$: 系統誤差の分散と平均 (100個程度)

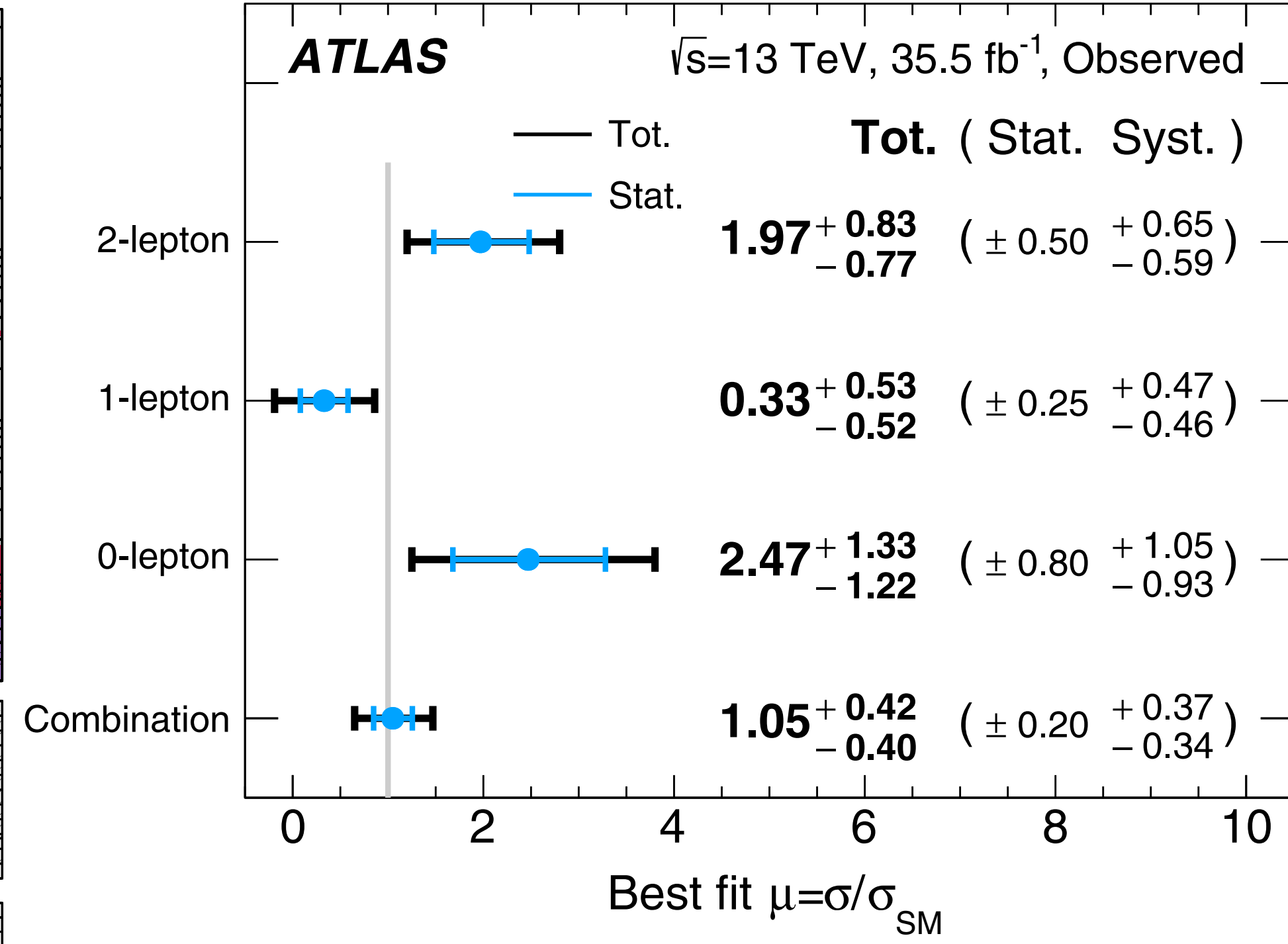
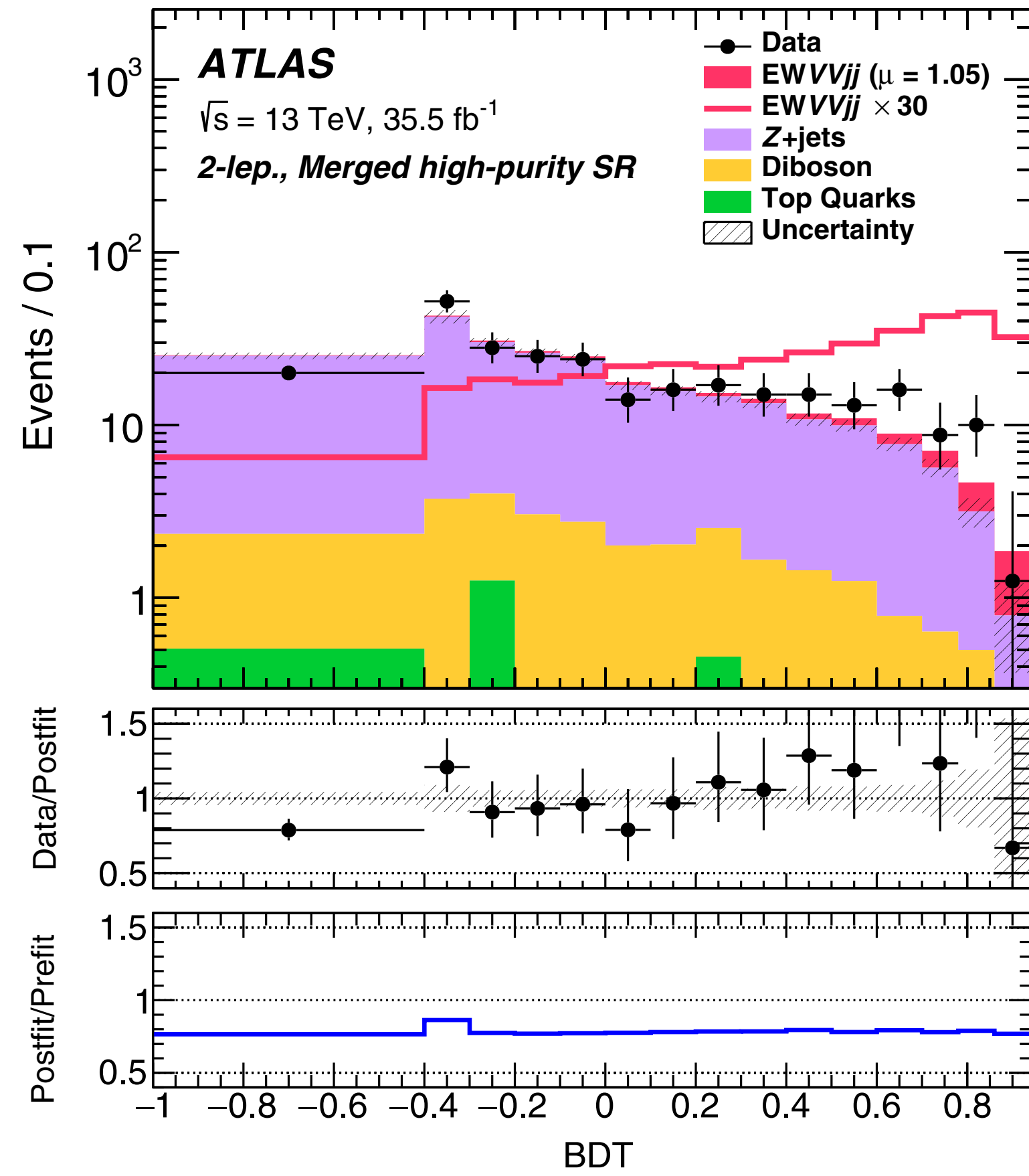
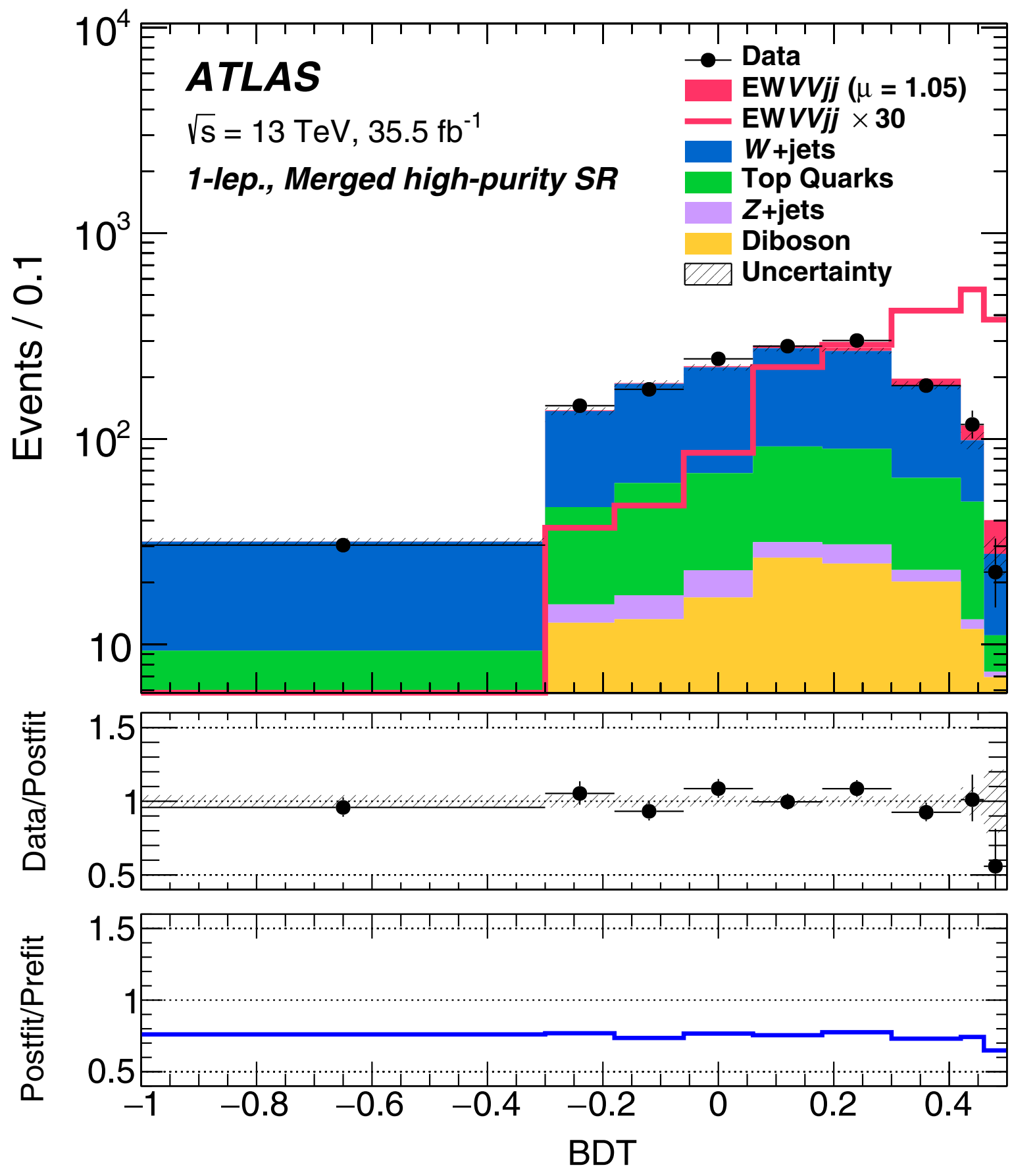
$\vec{\theta}_0$: fit前の系統誤差の分散と平均

W/Z+jetsのMCシミュレーションの
系統誤差が最も効く。

Sample	Category	Value
W+jets	merged	Float
W+jets	resolved	Float
Z+jets	merged	Float
Z+jets	resolved	Float
ttbar	merged	Float
ttbar	resolved	Float

測定結果

Phys. Rev. D 100, 032007



**2.7 σ (exp. 2.5 σ)の優位度でVBS事象を観測。
 ハドロン崩壊を使用したSM-VBSの初めての測定。**

Fiducial phase space	Predicted $\sigma_{EWVVjj}^{fid,SM}$ [fb]	Measured $\sigma_{EWVVjj}^{fid,obs}$ [fb]
Merged	11.4 ± 0.7 (theo.)	12.7 ± 3.8 (stat.) $^{+4.8}_{-4.2}$ (syst.)
Resolved	31.6 ± 1.8 (theo.)	26.5 ± 8.2 (stat.) $^{+17.4}_{-17.1}$ (syst.)
Inclusive	43.0 ± 2.4 (theo.)	45.1 ± 8.6 (stat.) $^{+15.9}_{-14.6}$ (syst.)

実験結果の再解釈: EFT

有効場理論(EFT: Effective Field Theory)

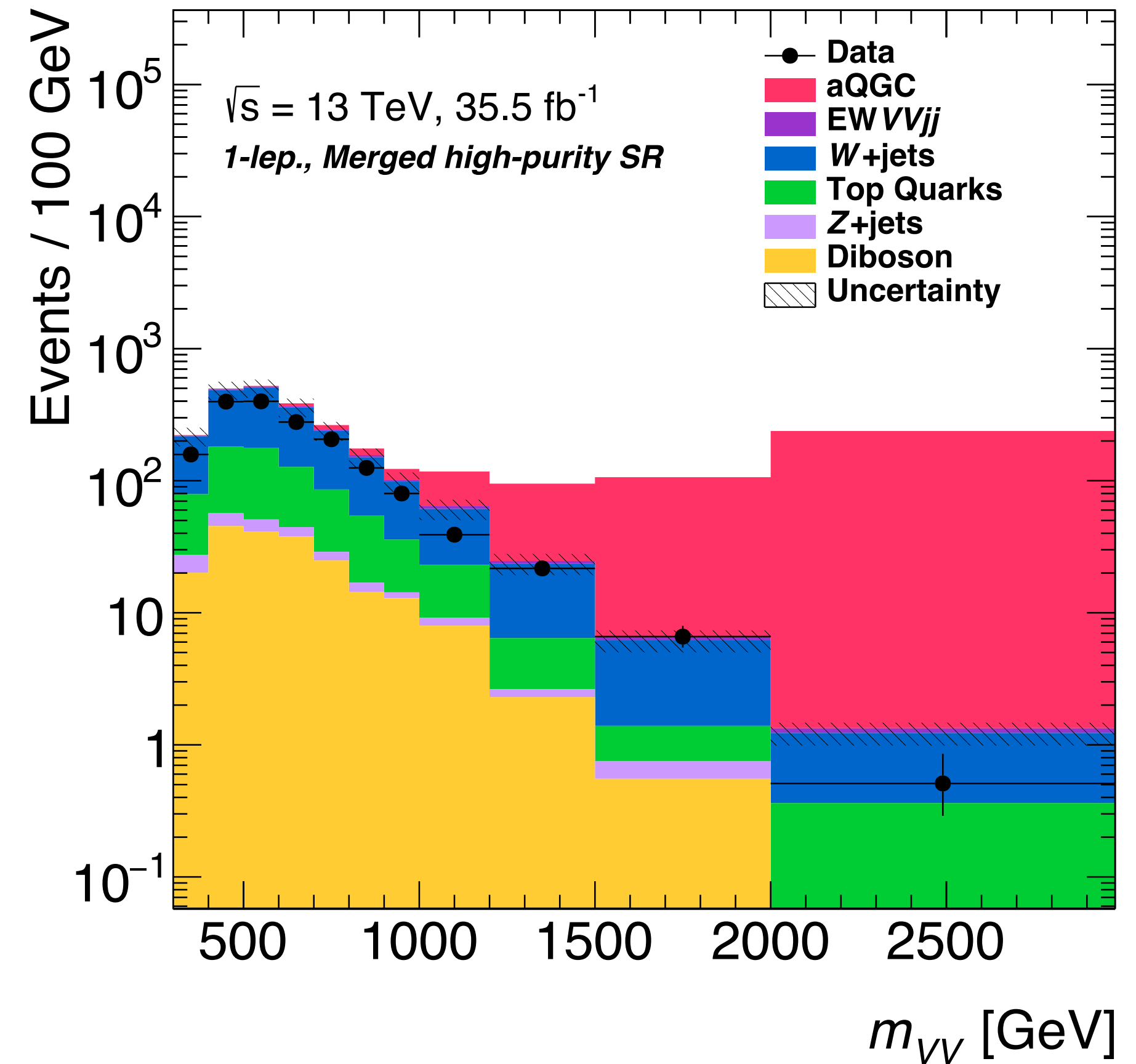
$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_{n>4} \sum_{i \in \text{operators}} \frac{f_{n,i}}{\Lambda^n} O_{n,i}$$

f : 結合定数

Λ : カットオフスケール

O : 演算子

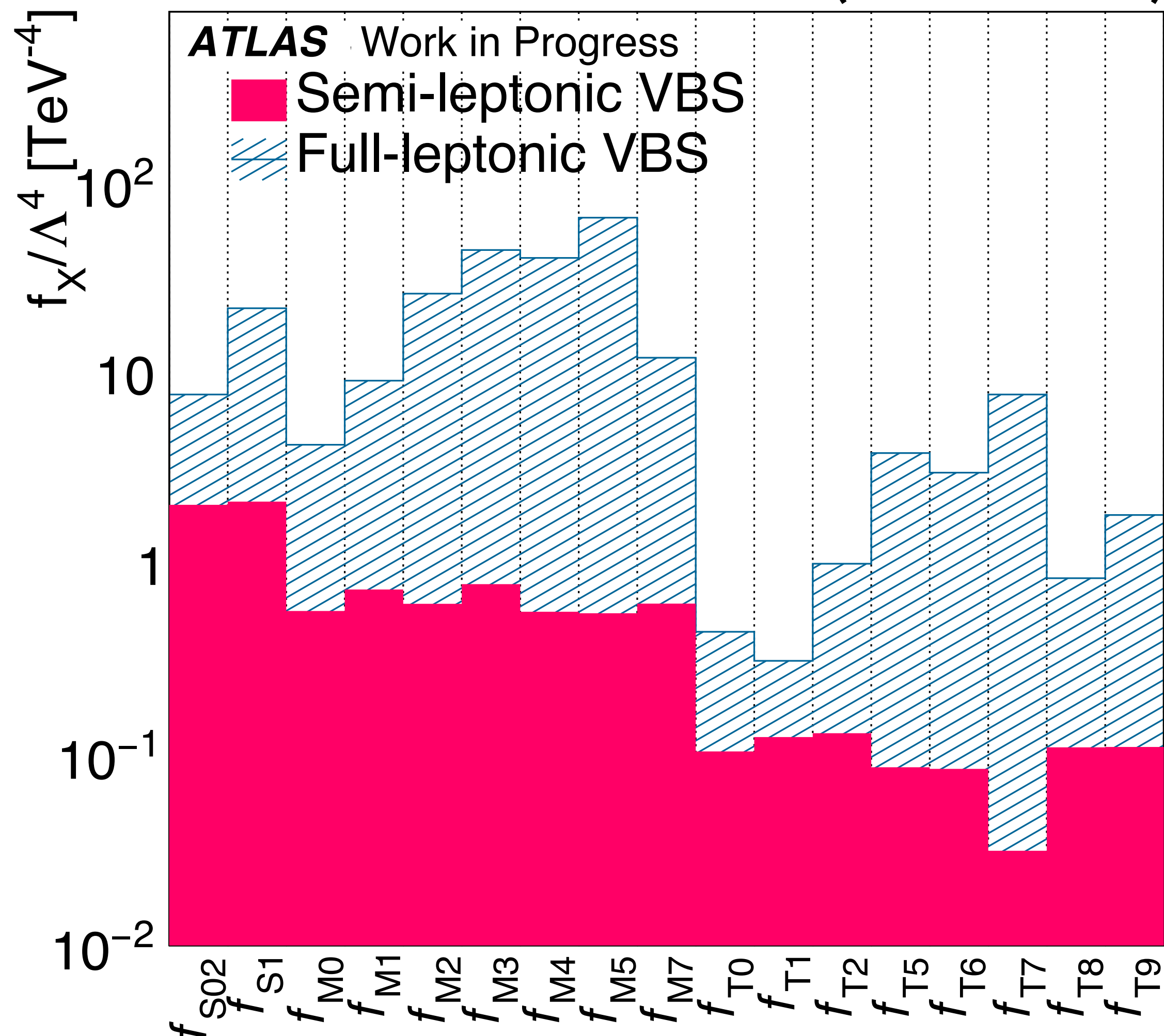
n : 質量次元



最も新物理の特徴を表す m_{VV} 分布を用いて再フィットする。

得られた新物理への制限

各結合定数の上限値 (95% C.L.)

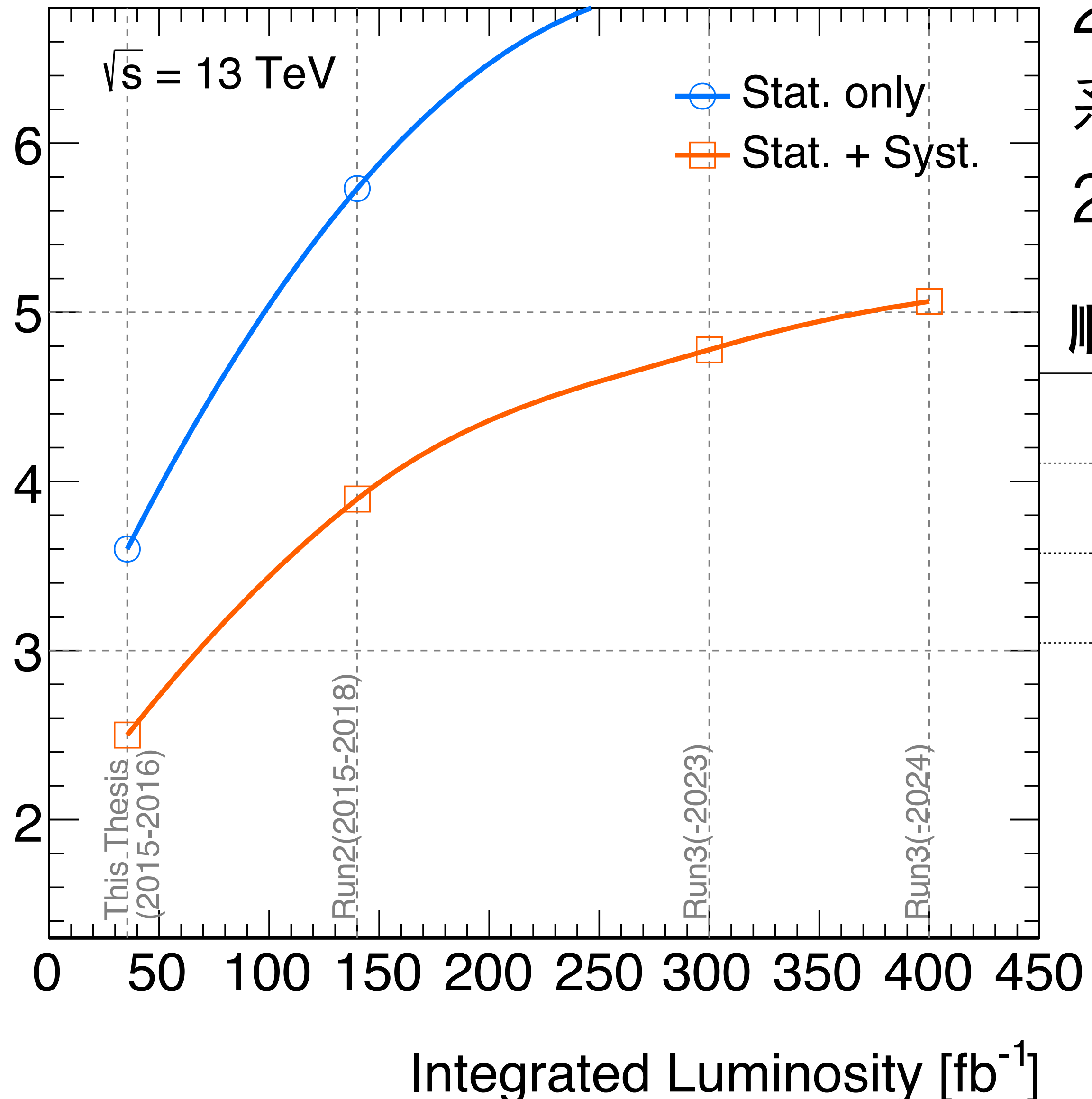


考えうる全ての演算子に対して、
現状で最も強い制限を得た。

新物理(8次元演算子)に対し、
Semi-leptonic VBS解析が
Full-leptonic 解析より感度がある。

展望

Expected Significance



2024年までのデータで発見(5σ)は確実。
 系統誤差の改善次第では、
 2018年のデータでも発見の可能性がある。

順位	系統誤差	$\Delta \mu$
1	Z+jets mjj reweighting	~0.13
2	diboson normalization	~0.09
3	W+jets mjj reweighting	~0.08
4	W+jets normalization factor	~0.07

Run2全データでより
 精密な測定が進行中

東大 野辺氏
 筑波大 若狭氏
 お茶大 藤本氏

まとめ

2016年までのATLAS実験Run2のデータ(36/fb)を用いてSemi-leptonic VBS過程を、世界で初めて 2.7σ の優位度で測定した。

信号強度は、

$$\mu_{EW VVjj}^{\text{obs}} = 1.05_{-0.40}^{+0.42} = 1.05 \pm 0.20(\text{stat.})_{-0.34}^{+0.37}(\text{syst.})$$

であった。

優位な標準模型からの超過が見つからなかったため、

EFTを用いて一般の新物理に対して、制限を設けた。

full-leptonicに比べ良い感度があることを示した。

Run2全データを用いて、VBSのさらなる精密測定と

よりエネルギースケールの大きい or 結合定数が小さい新物理探索が進行中。

Backup

具体例：電弱スキルミオン

M Kurachi et. al.

[1703.06397](#)

[Slides](#)

カイラル対称性の破れ → 擬NGボソン “Pion” → 核子(ソリトン解)

電弱対称性の破れ → 擬NGボソン “Higgs” → 暗黒物質(ソリトン解)?

Lower bound

DM direct detection

&

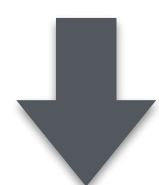
Upper bound

WW scattering

$$1.5 \text{ TeV} \lesssim M \lesssim 34 \text{ TeV}$$



$$2.5 \text{ TeV}$$



$$\sim 5 \text{ TeV}$$

$$\sim 10 \text{ TeV}$$

Xenon1T

LZ

$$8 \text{ TeV}$$



$$\sim 4 \text{ TeV}$$

LHC RUN2

← May, 2016

← today

in case $\alpha_4 < 0.1$

← near future

in case $\alpha_4 < 0.01$

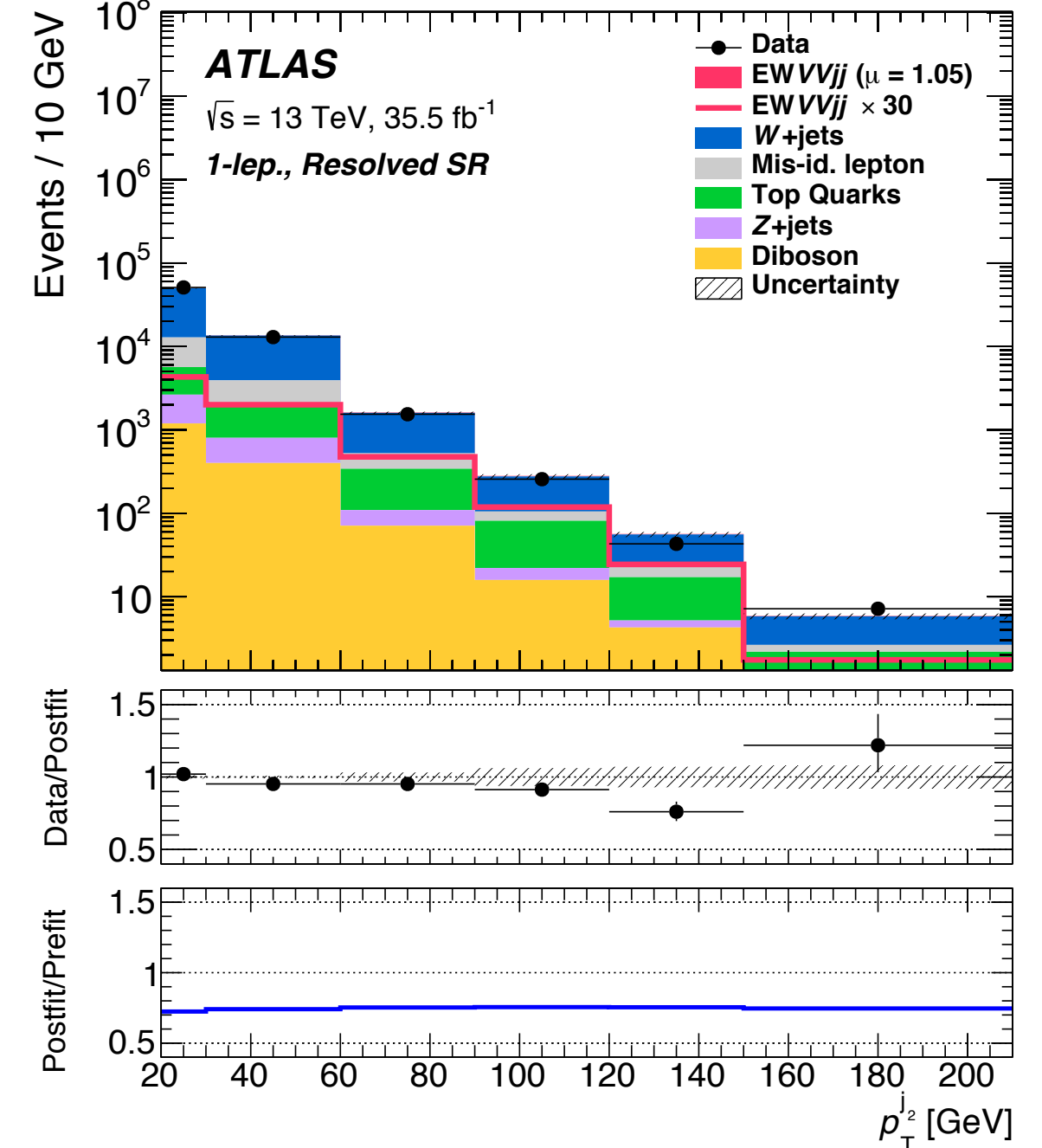
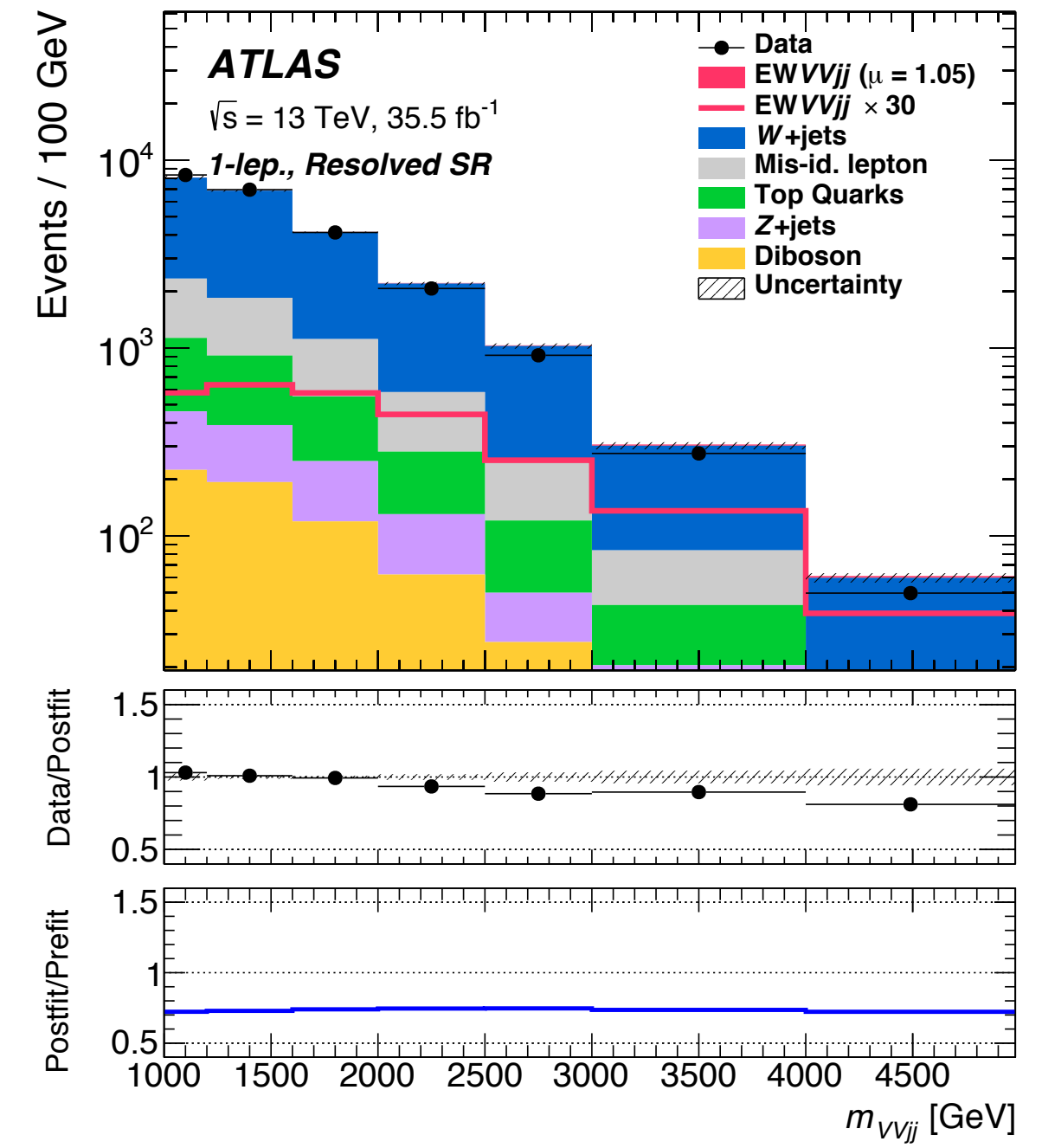
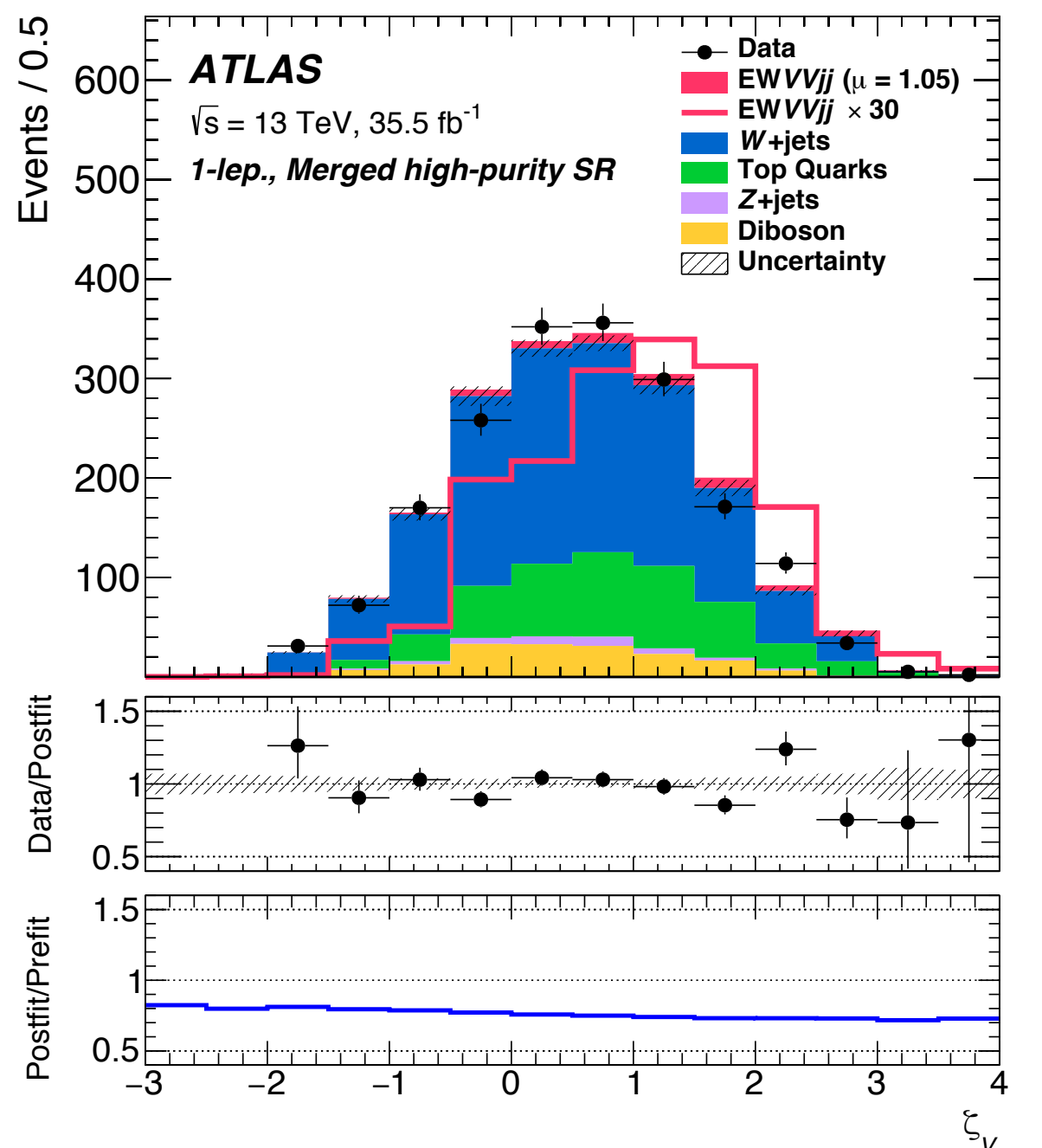
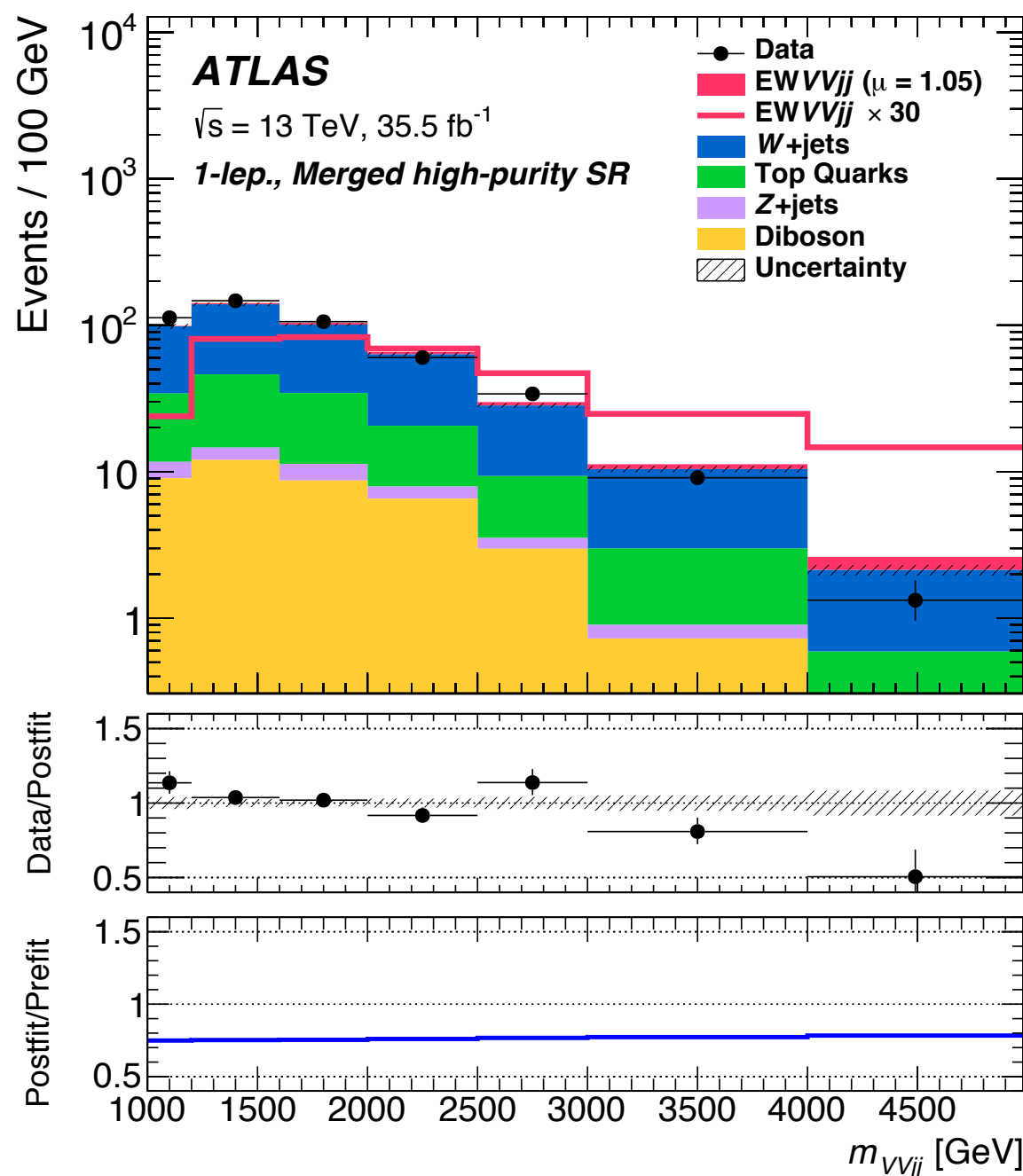
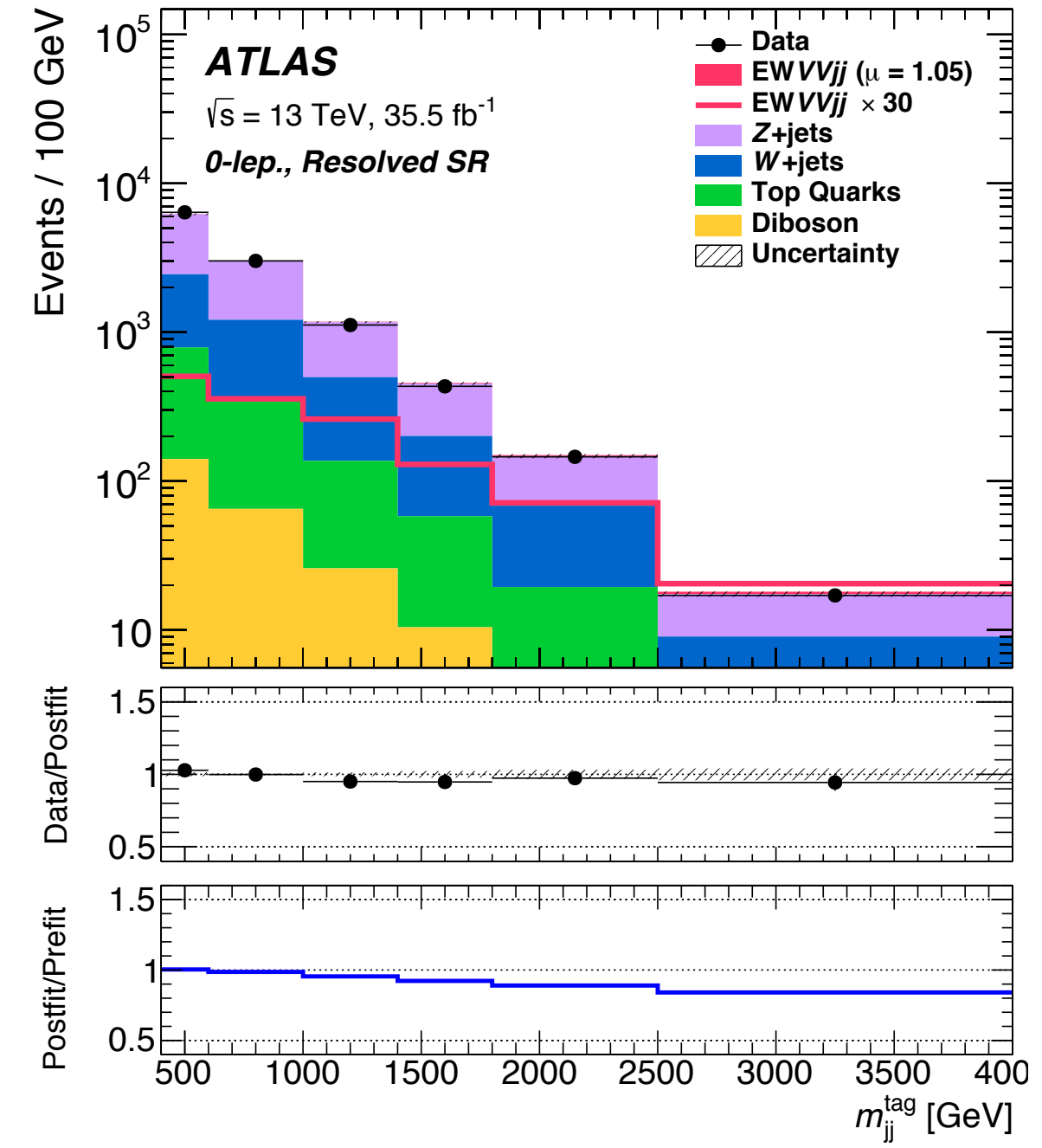
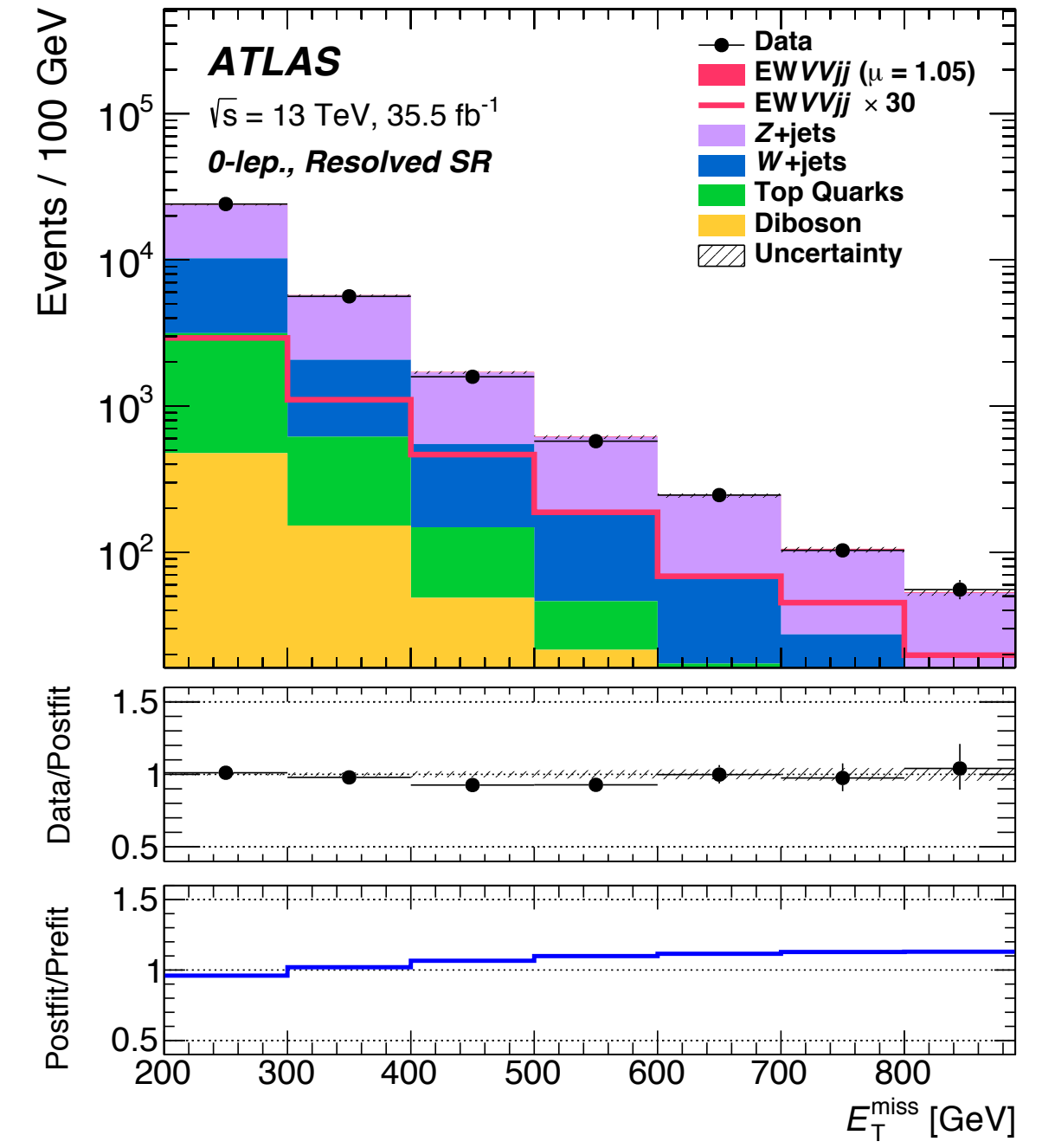
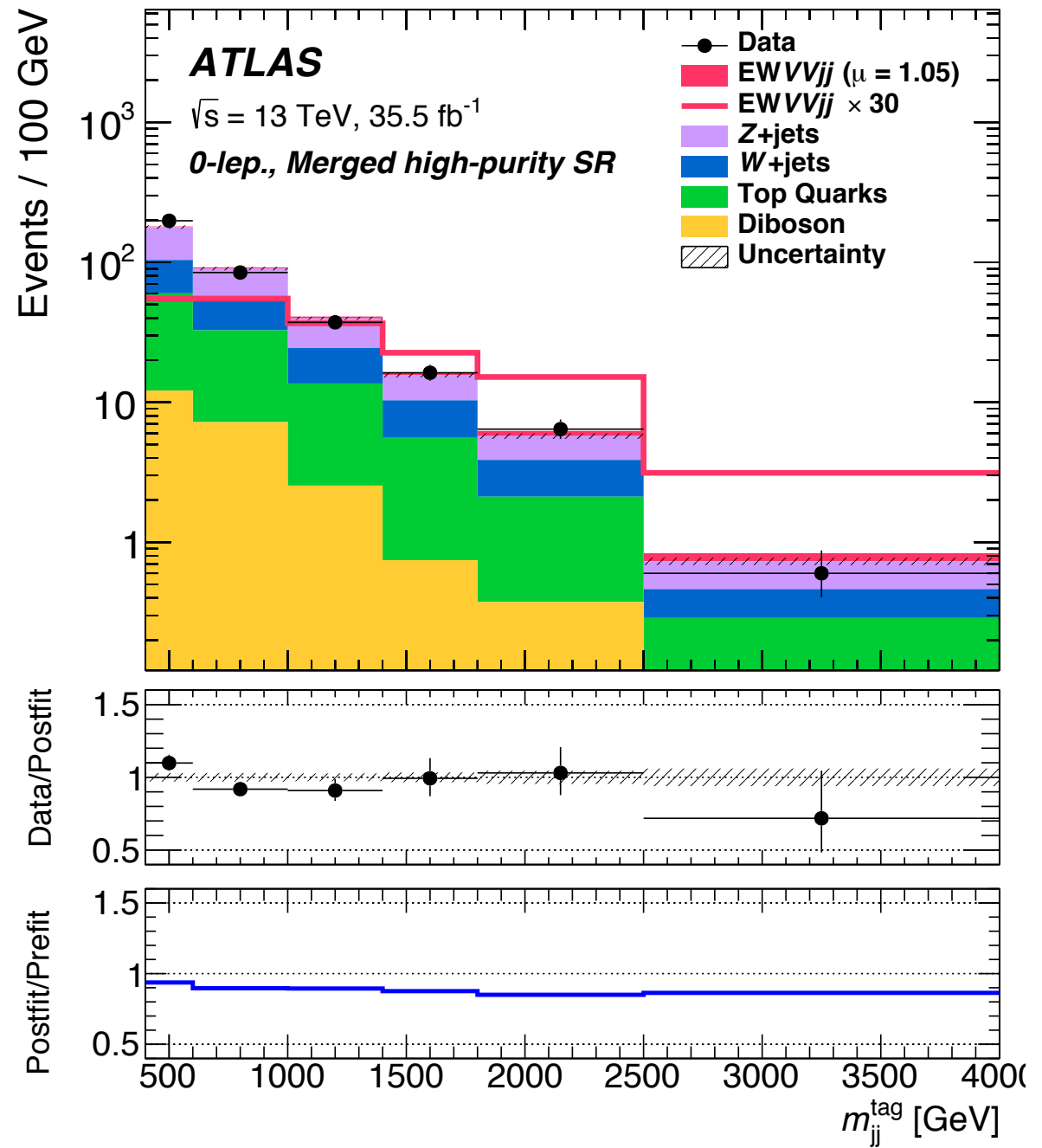
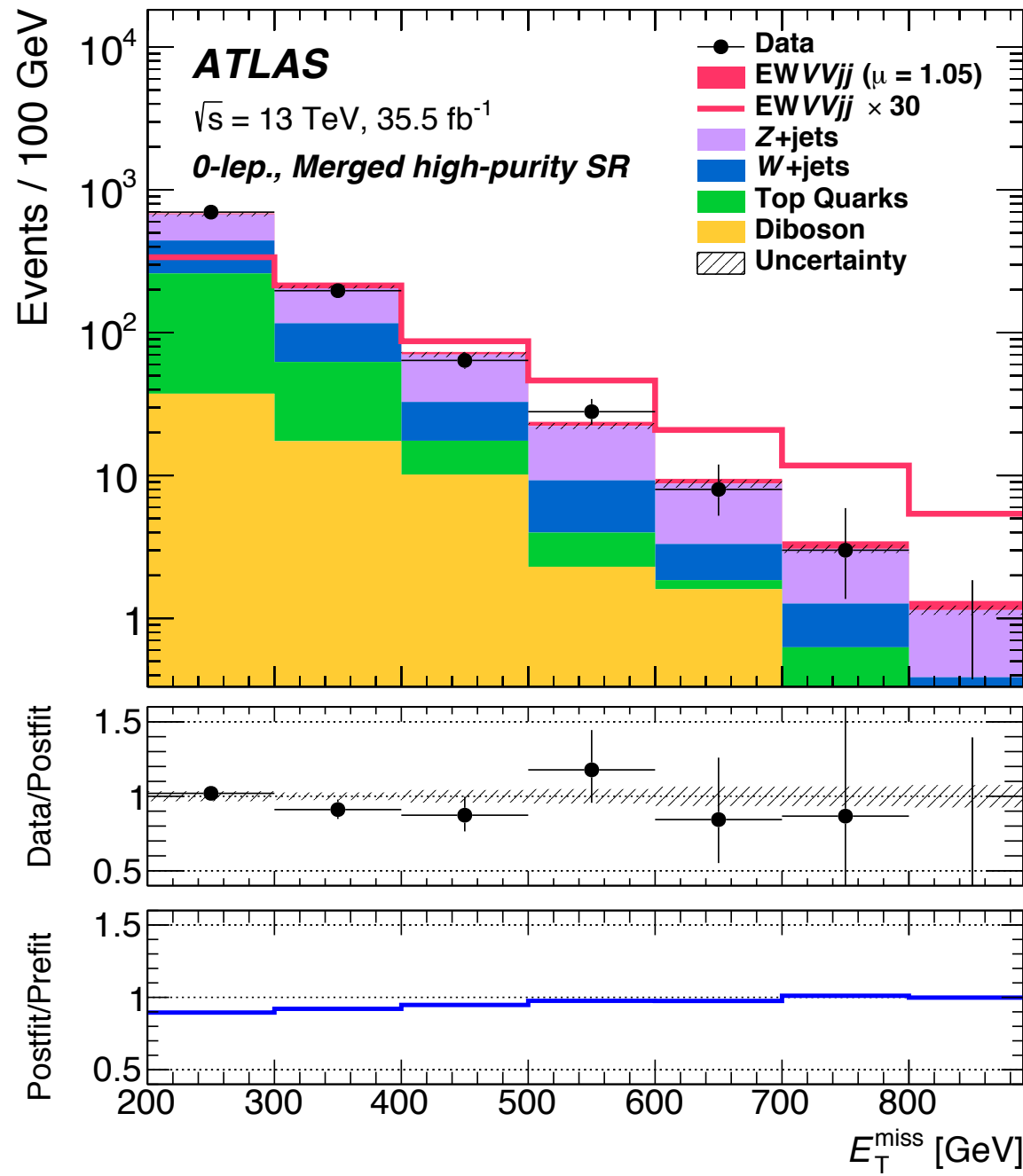
Conversion EFT to EW chiral Lagrangian.

$$\alpha_4 = \frac{v^4}{16} \cdot \frac{f_{S,0} + f_{S,2}}{\Lambda^4}$$

$$\alpha_5 = \frac{v^4}{16} \cdot \frac{f_{S,1}}{\Lambda^4}$$

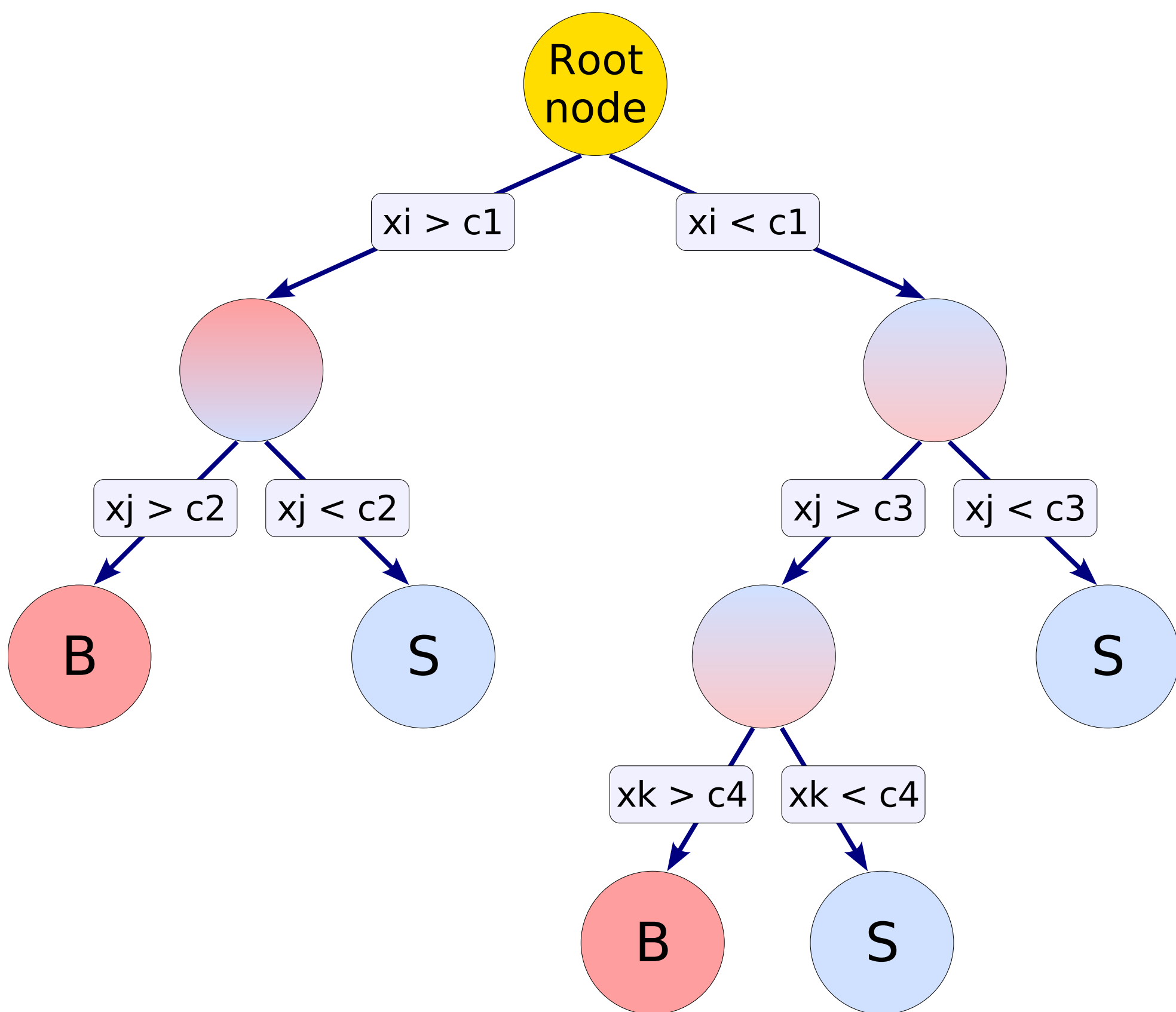
Our limits : $f_{S,0} = f_{S,2} = 2$

→ $\alpha_4 = 0.001$, probably it's possible to observe or exclude Electroweak-Skyrmion by our results.



Boosted Decision Tree (BDT)

Decision Tree

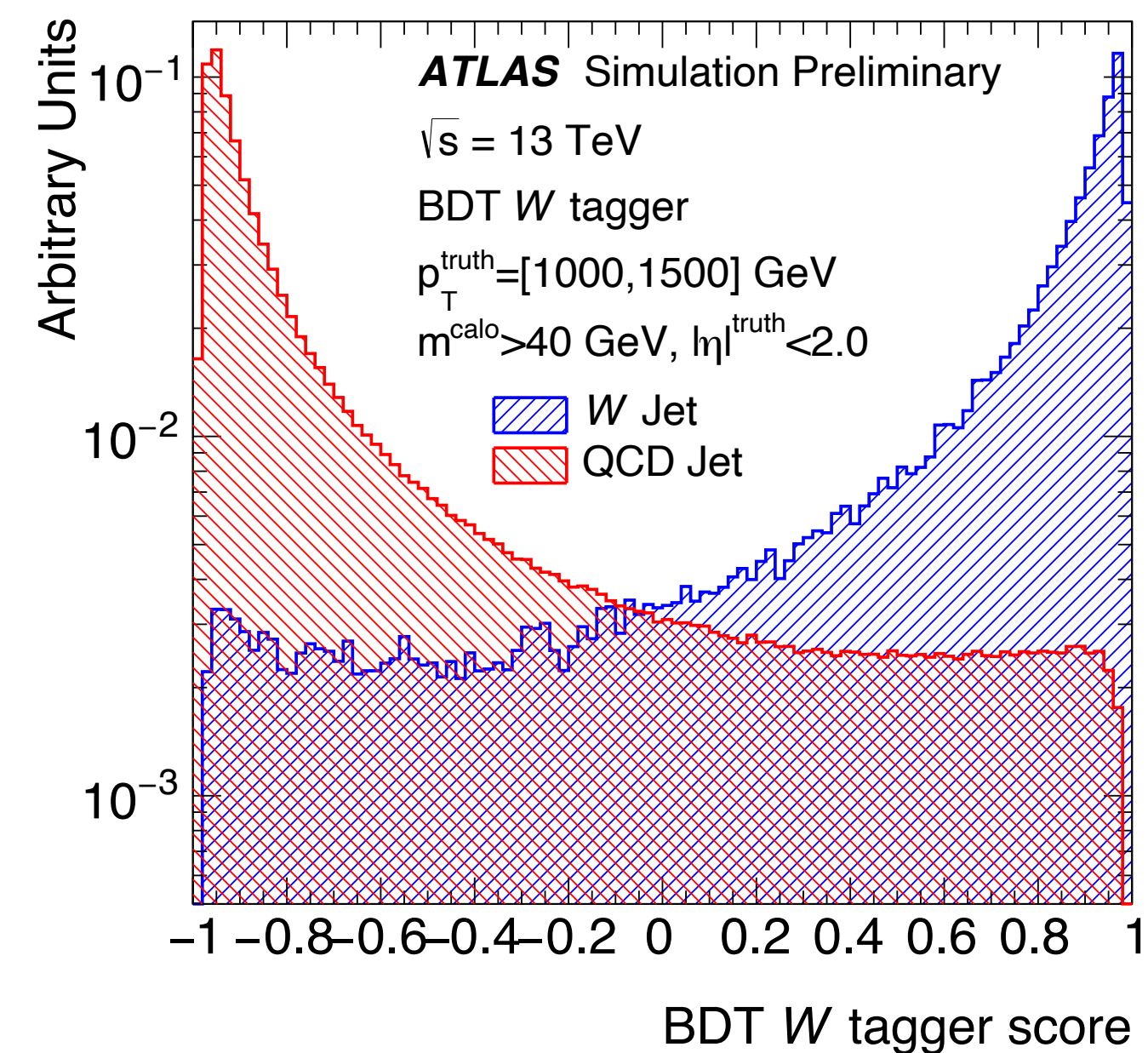


BDT: 多変数からなる決定木をBoostさせる機械学習アルゴリズム。

Boost: 決定木を大量に生成し、それらの性能に応じた重み付け平均をとる。

BDT outputの一例 →

多変数から信号と背景事象を分ける1変数を生成する。

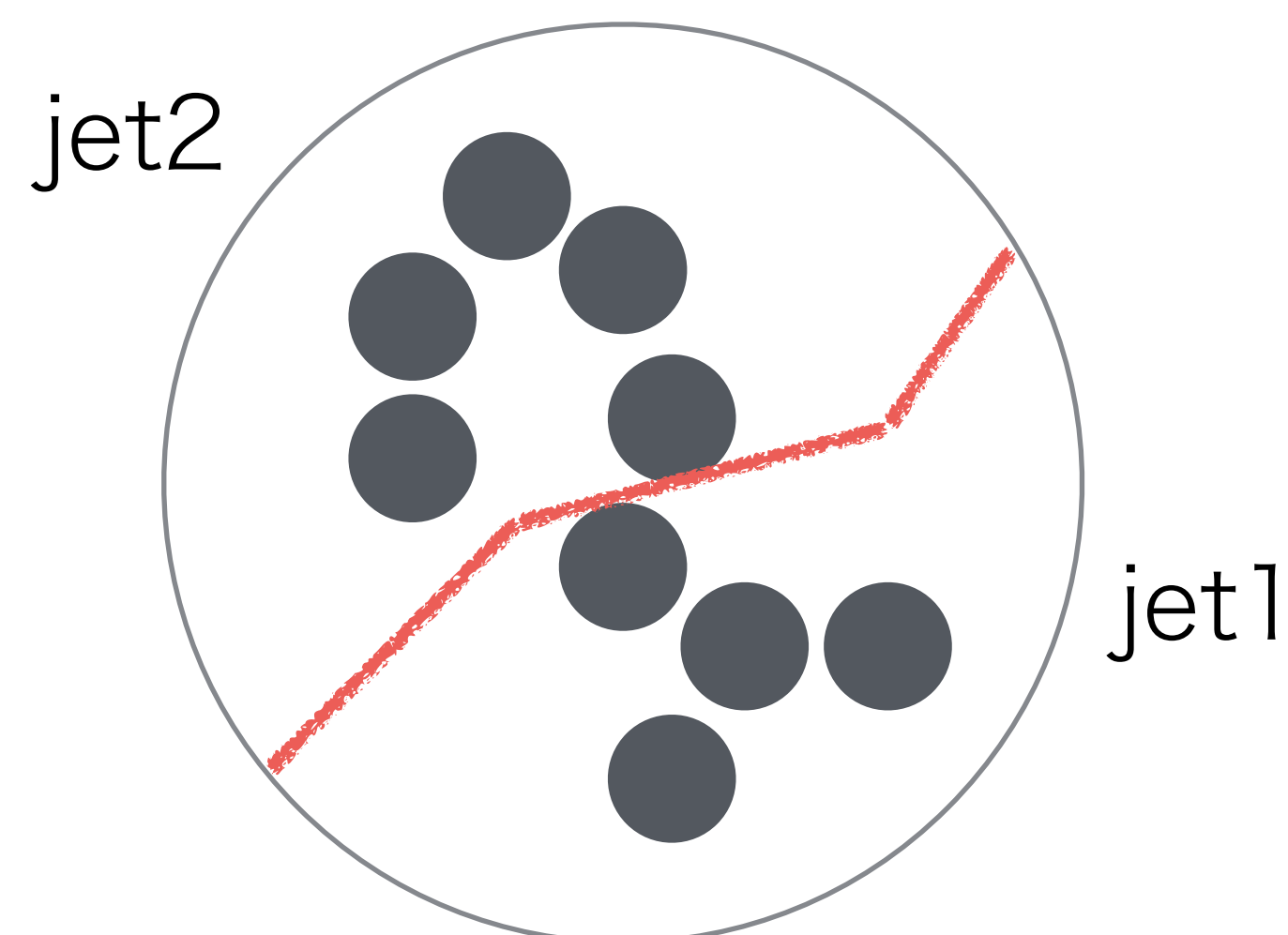


2. ボソン偏極への感度

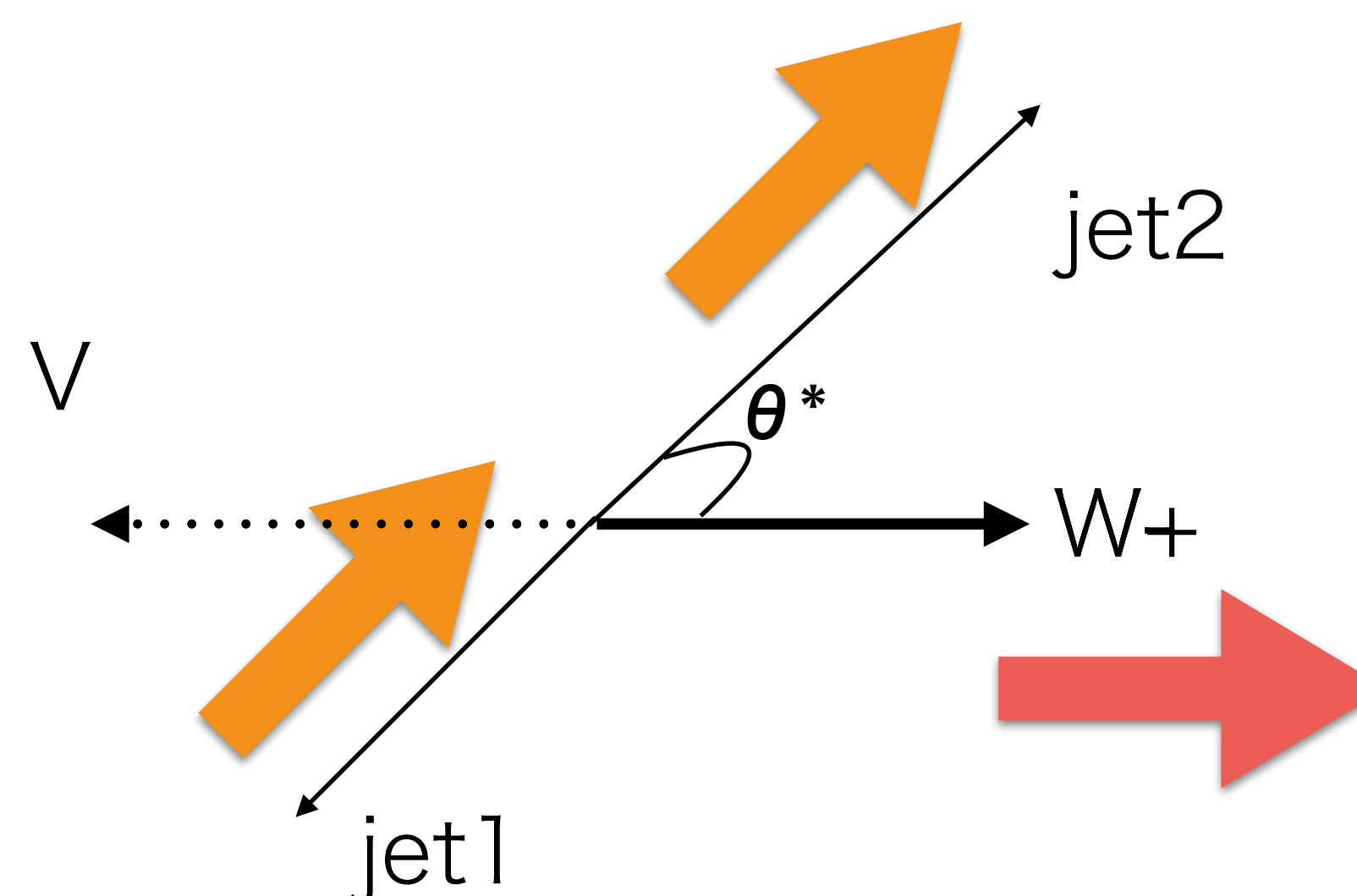
unitarityの破れがおこるのは $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$ 散乱; 性質測定の観点から偏極は重要
大半径ジェットを用いたW偏極測定の研究は、今までおこなわれていなかった。

[方法]

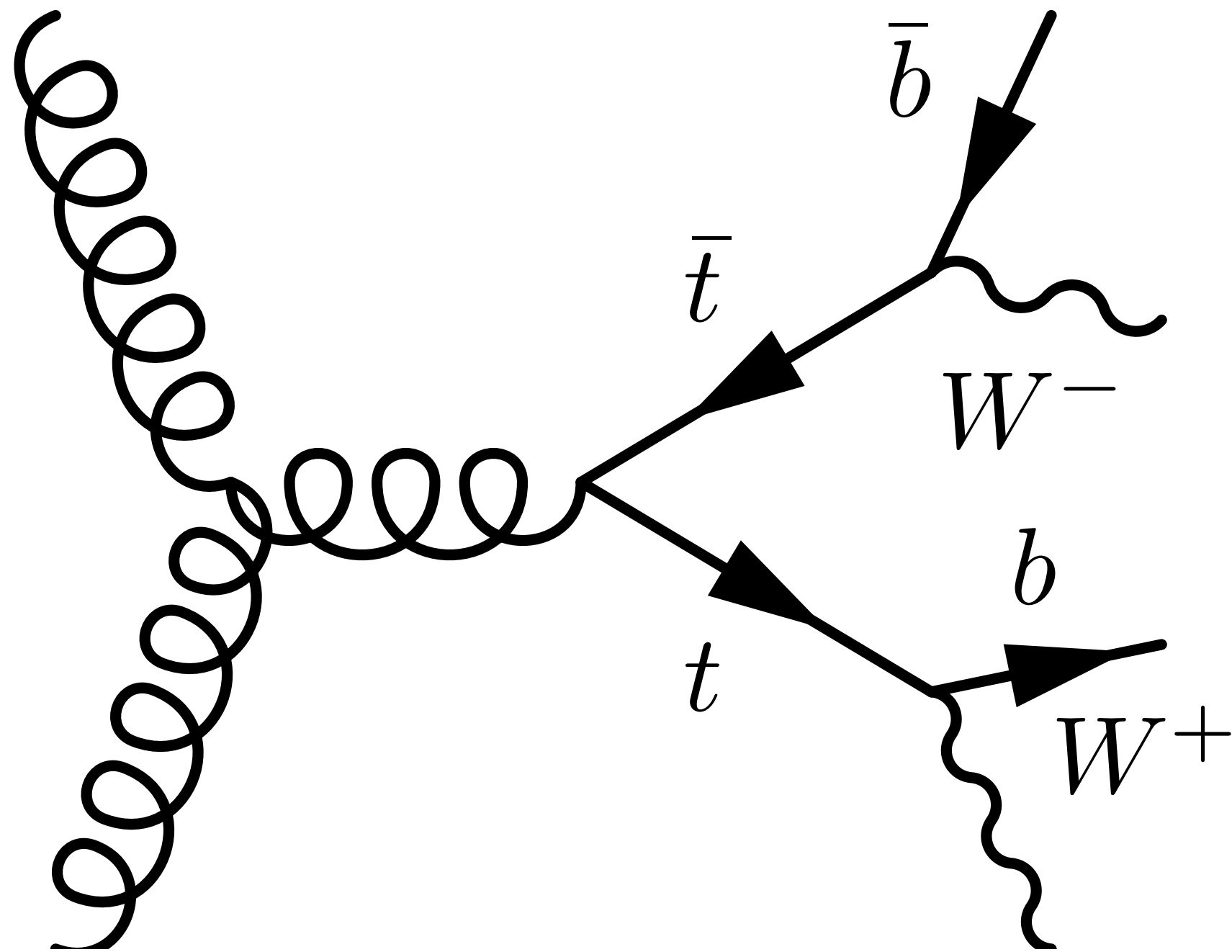
① ジェットを2つに分割する。



② W静止系で θ^* を再構成



偏極測定の実現可能性の検証



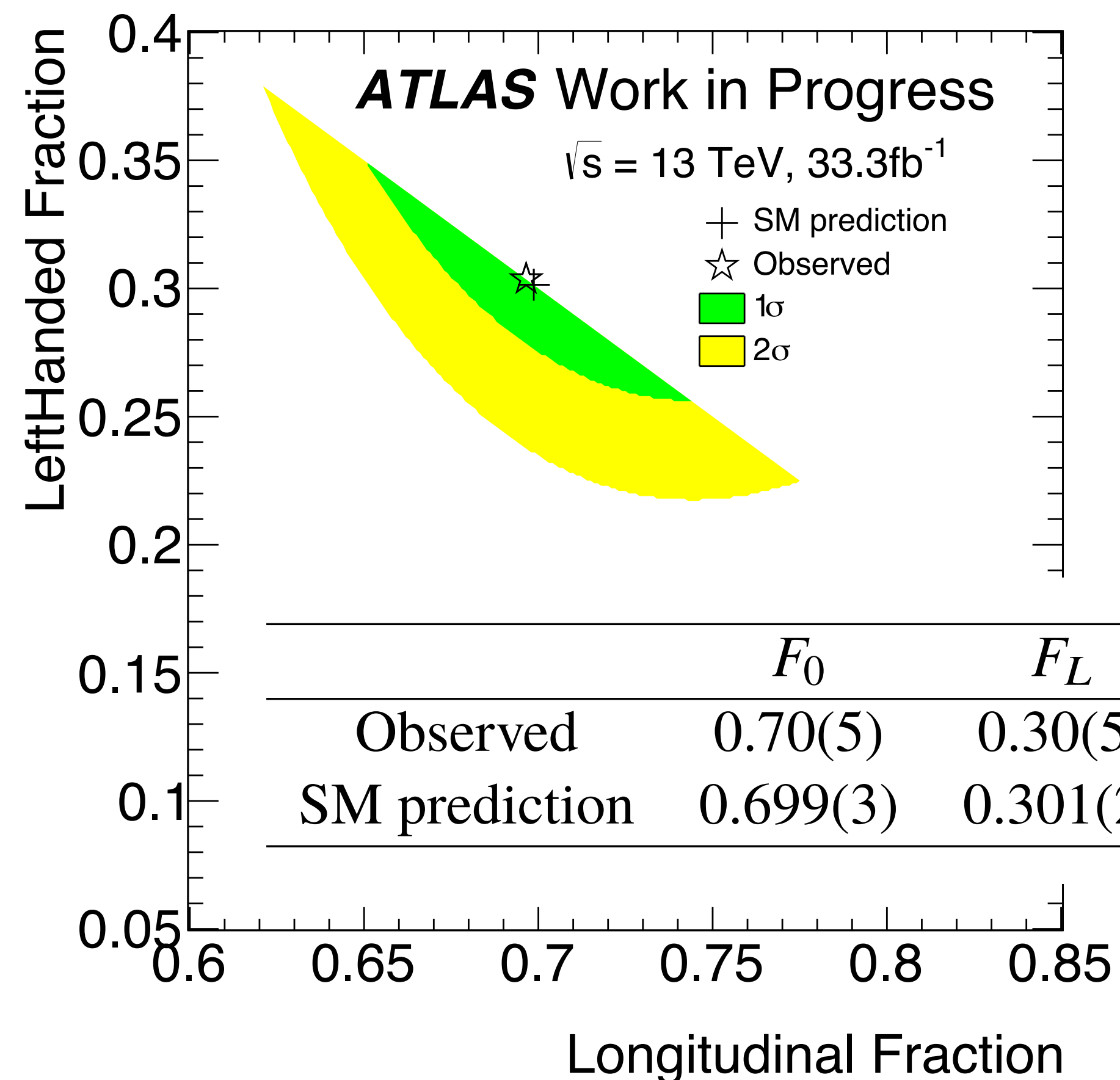
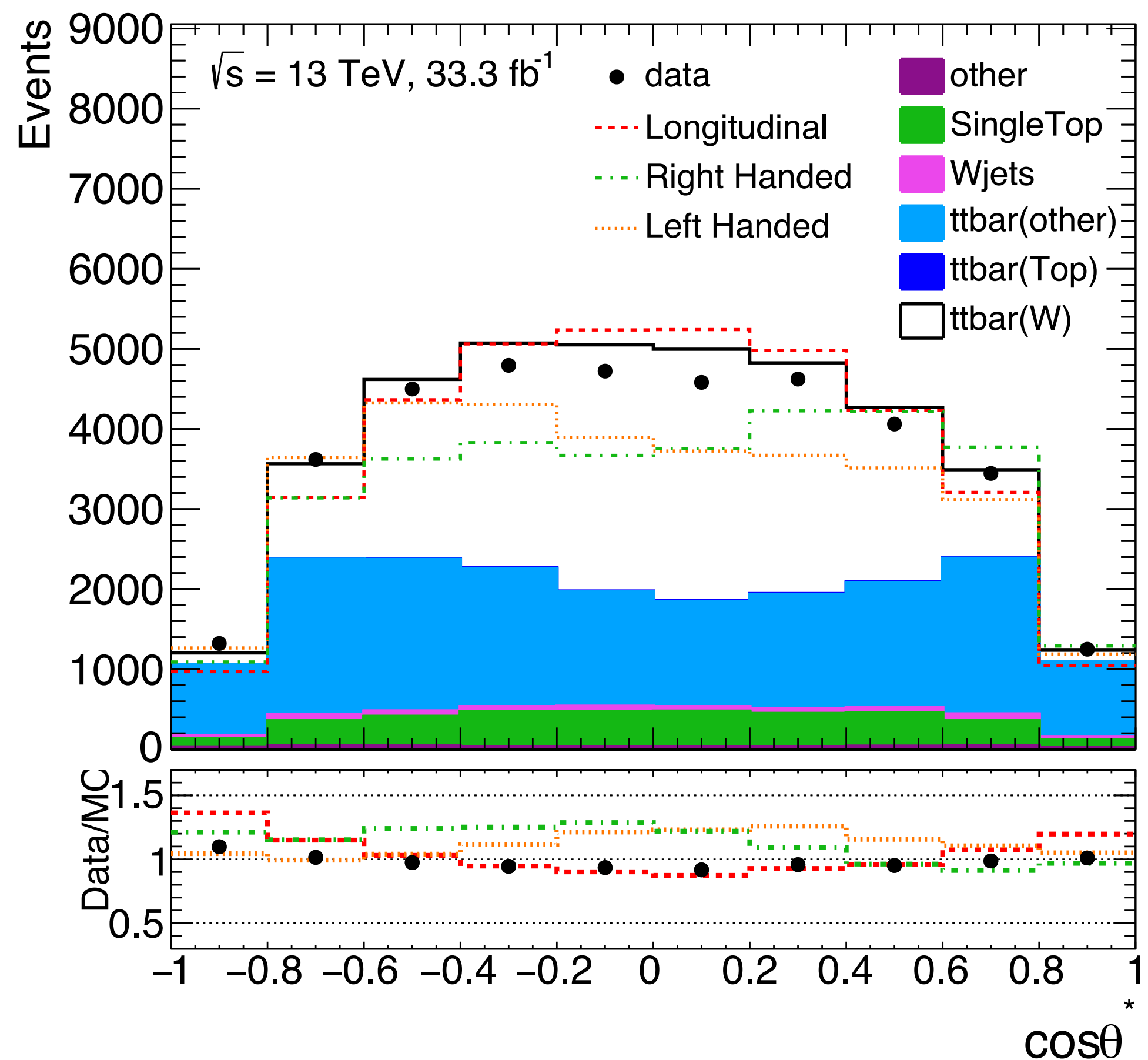
top由来のWボソンの偏極は精度よく計算されており、lepton崩壊を用いて実験的に検証されている。

→大半ジェットを使った手法で
無矛盾な結果が得られるかを確認する。

2016年のデータに、
1レプトン&MET>20GeV,
 $\Delta R(W\text{ジェット}, B\text{ジェット}) > 1.4$ 等を要求

50%程度の純度でWジェットサンプルを選択できる。

Wジェットを用いたW偏極測定



結果は標準模型の予言 & レプトン崩壊を用いた測定結果と無矛盾。

→ **VBSの縦波成分の割合の測定・抽出がハドロン崩壊するWがあっても可能。**