

Spin-1 particle and the ATLAS Diboson excess

Tomohiro Abe (KEK)

based on the works

1507.01185: TA, Ryo Nagai, Shohei Okawa, Masaharu Tanabashi

1507.01681: TA, Teppei Kitahara, Mihoko Nojiri

基研研究会 PPP2015

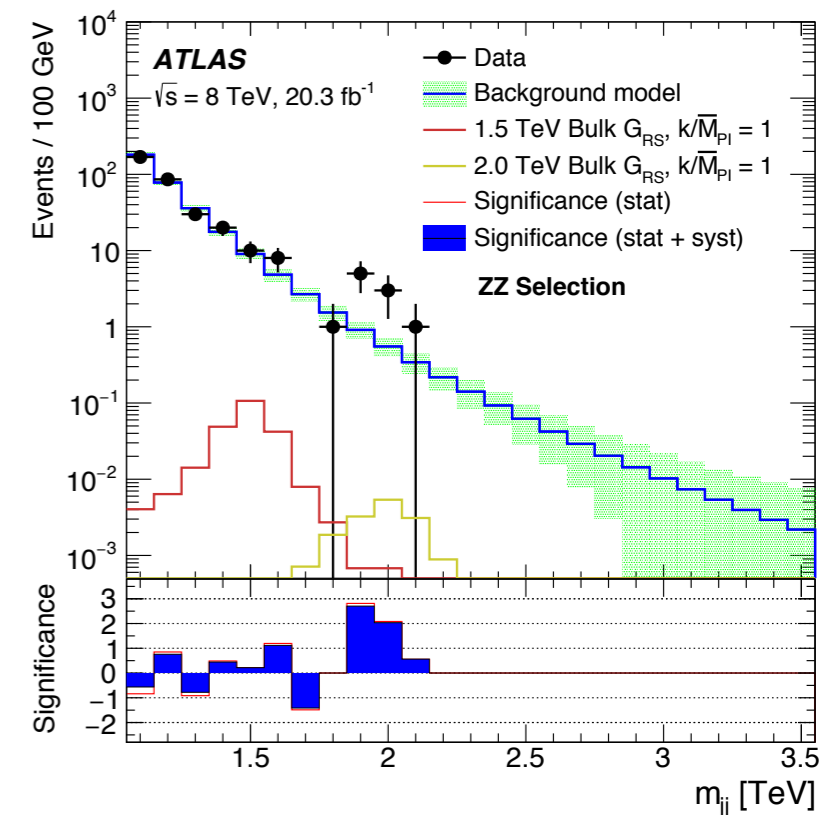
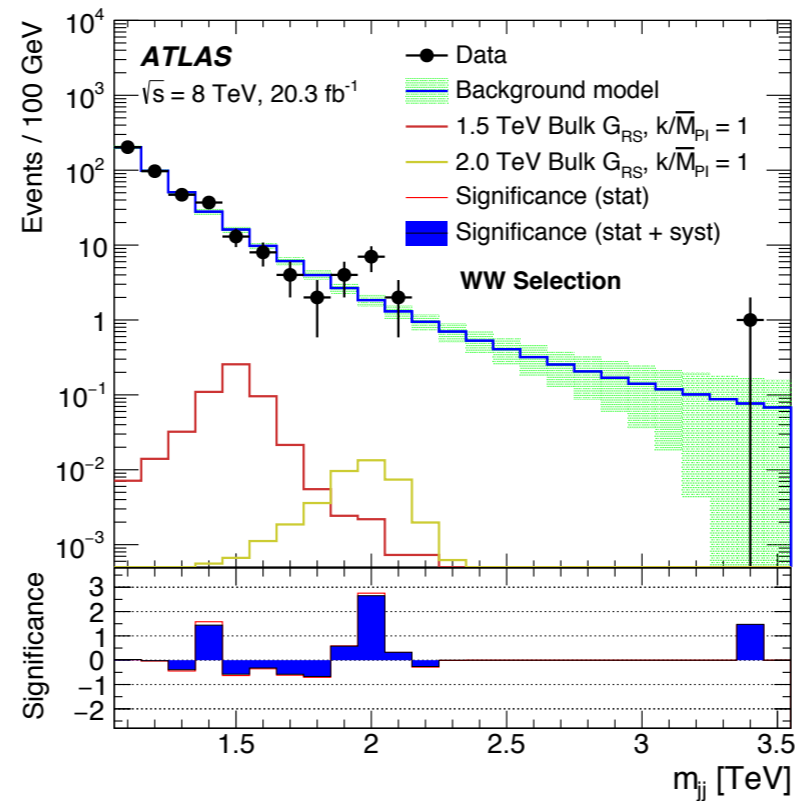
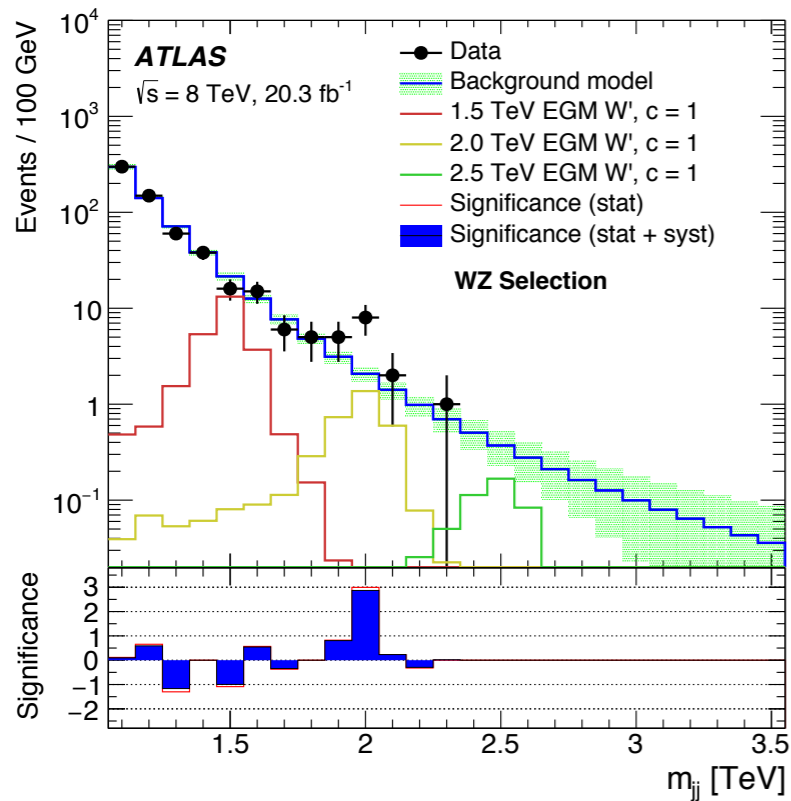
2015.9.15

今日話したいこと

- **ATLAS diboson anomaly**
- **spin1 粒子を導入した模型**
 - ★ 電弱対称性は $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$
 - ★ くりこみ可能
 - ★ ATLAS diboson anomaly を説明可能
- **LHC 13 TeV における W' 探索の見通し**
 - ★ $pp \rightarrow W' \rightarrow WZ \rightarrow \text{jets}$
- **まとめ**

ATLAS diboson excess

ATLAS EXOT-2013-008



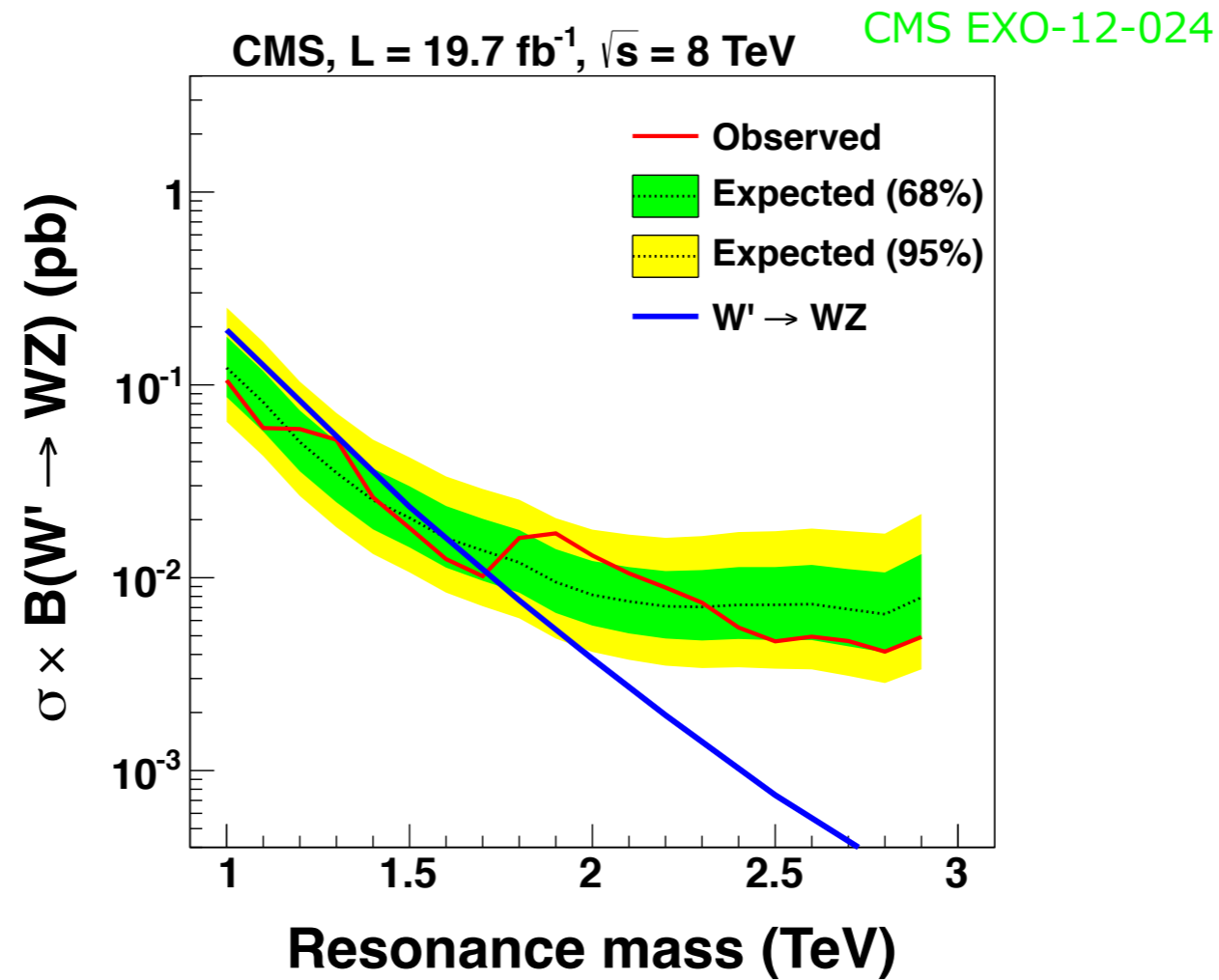
- $pp \rightarrow X \rightarrow WZ/WW/ZZ \rightarrow$ two fat jets

- ★ mass of $X \sim 2\text{TeV}$?

- ★ local significance: WZ 3.4σ , WW 2.6σ , ZZ 2.9σ

- ★ global significance: WZ 2.5σ

CMS の同じプロセスには excess 無し

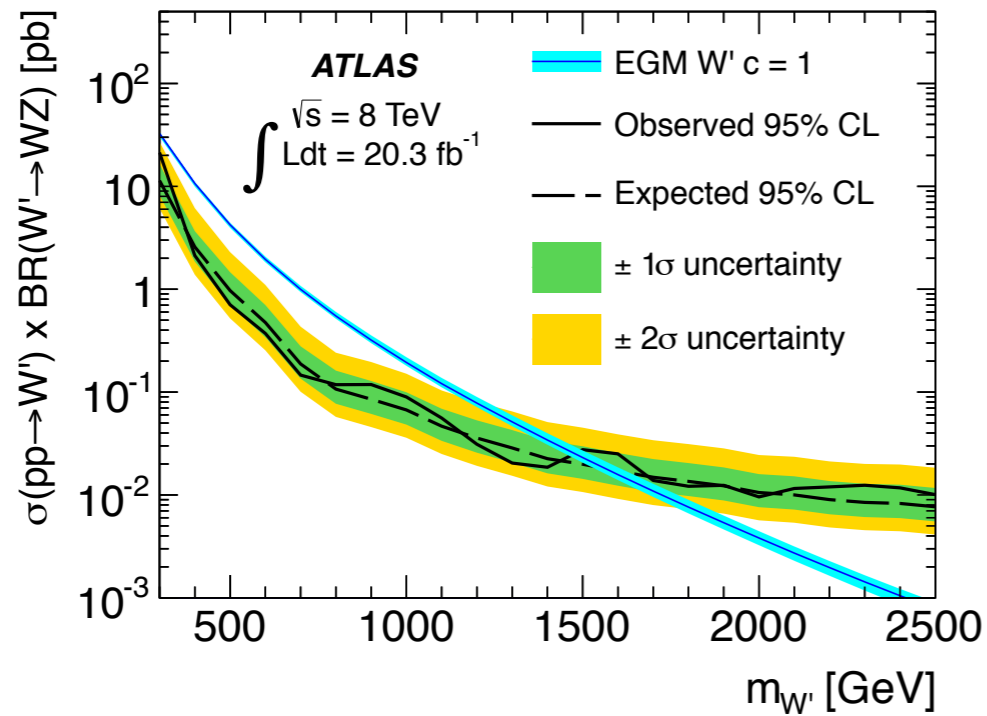


lepton を含む崩壊モードに excess 無し

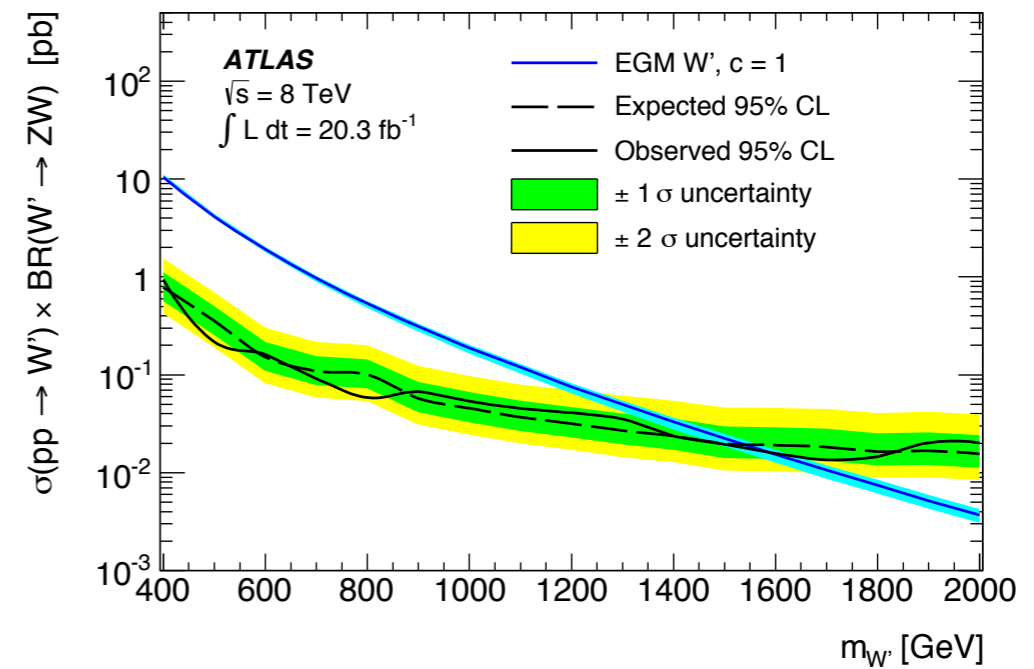
ATLAS EXOT-2013-001

ATLAS EXOT-2013-006

ATLAS(WZ → lv + jets)

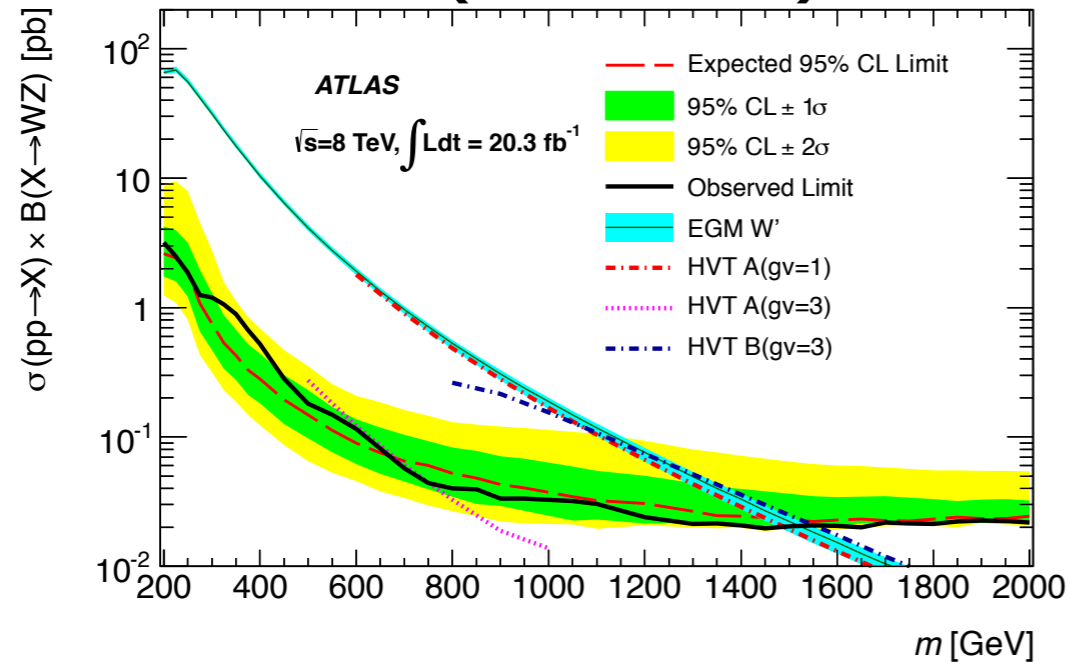


ATLAS(WZ → jets + leptons)

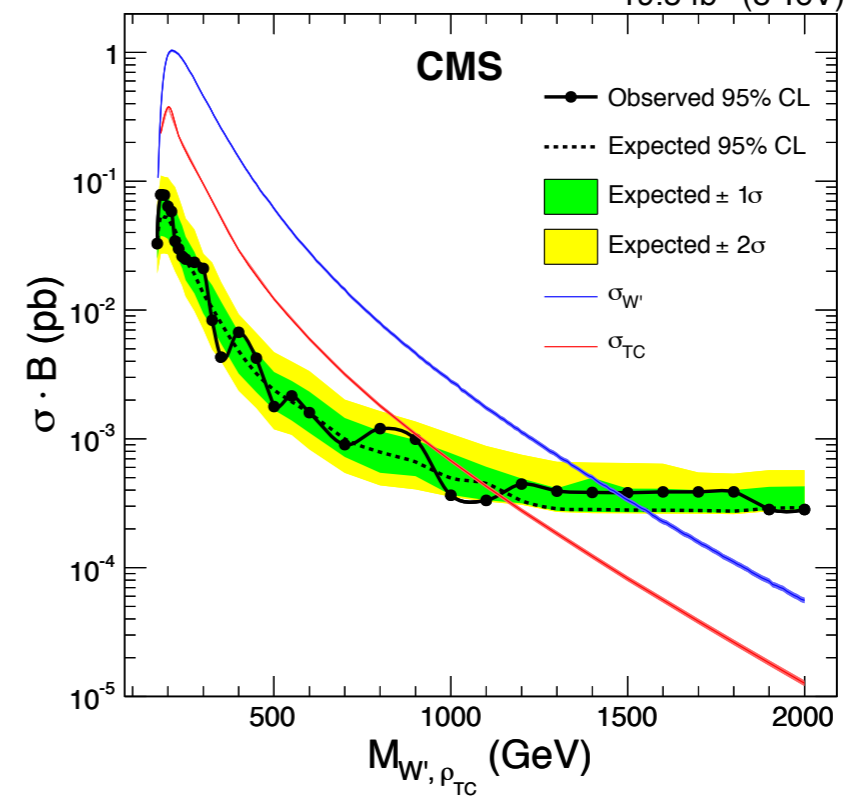


ATLAS EXOT-2013-007

ATLAS(WZ → lv + ll)



CMS(WZ → lv + ll) 19.5 fb⁻¹ (8 TeV) CMS EXO-12-025



diboson の各崩壊過程のまとめ

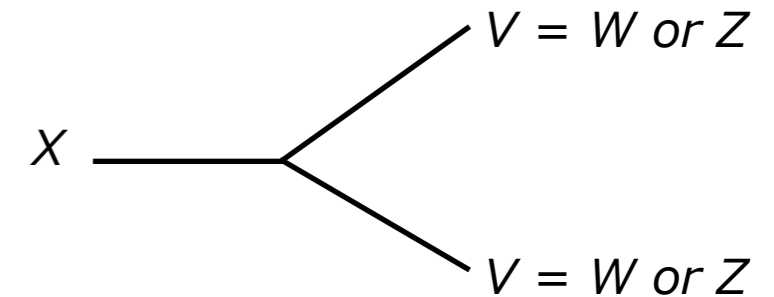
final states	ATLAS	CMS
$VV \rightarrow \text{jets}$	excess	no excess
$WZ \rightarrow \ell \nu$ $WZ \rightarrow \text{jets} + \ell \ell$ $WZ \rightarrow \ell \nu +$	no excess	no excess

- **Excess は ATLAS の $pp \rightarrow VV \rightarrow \text{jets}$ 過程にのみ存在**
 - ★ local: WZ 3.4σ , WW 2.6σ , ZZ 2.9σ
 - ★ global: WZ 2.5σ
- **Excess は単なる統計の揺らぎ？**
- **どんなモデルで excess が説明可能か抑えておくことは重要**

Excess についてわかっていること

- 新粒子 (X) は ボソン

- ★ $WZ/WW/ZZ$ へ崩壊する

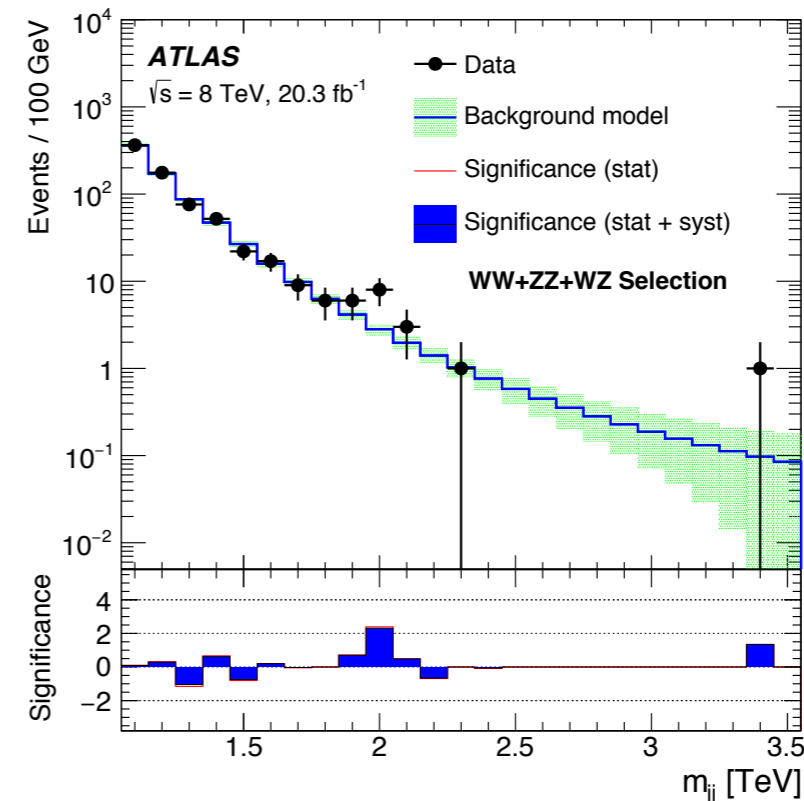
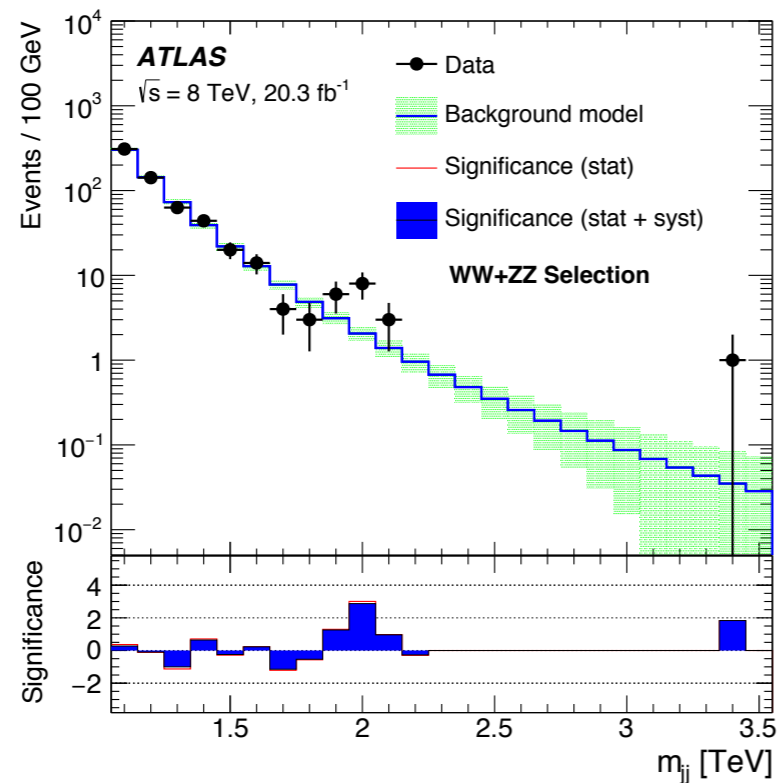


- $WZ/WW/ZZ$ の区別はきちんとついていない

- ★ $|m_j - m_V| < 13\text{GeV}$

- ★ 3つのチャンネル全てを説明する必要は無い

ATLAS EXOT-2013-008



Works in market (~50 papers)

- **Spin 0 ($S \rightarrow WW, S \rightarrow ZZ$)**

1507.02483, 1507.03553, 1507.04431, 1507.05028, 1507.05310, 1507.06312, 1508.04814, 1508.05632, 1509.02039

- **Spin 1 ($W' \rightarrow WZ, Z' \rightarrow WW$)**

1506.03751, 1506.03931, 1506.04392, 1506.05994, 1506.06064, 1506.06736, 1506.06767, 1506.07511, 1506.08688, 1507.00013, 1507.00268, 1507.00900, 1507.01185, 1507.01638, 1507.01681, 1507.01914, 1507.01914, 1507.01923, 1507.02483, 1507.03098, 1507.03428, 1507.03553, 1507.03940, 1507.04431, 1507.05028, 1507.05299, 1507.05310, 1507.06018, 1507.06312, 1507.07102, 1507.07406, 1507.07557, 1507.08273, 1508.00174, 1508.02277, 1508.03544, 1508.04129, 1508.05940, 1509.00441, 1509.01606, 1509.02787

- **Spin 2**

1507.03553, 1507.06312, 1508.04814

spin 別の特徴

- **Spin 0 ($S \rightarrow WW, S \rightarrow ZZ$)**

- ★ 素朴には断面積が足りない
- ★ 適当な模型だとうまくいかない (例えば K^0 - K^0 bar とかにひっかかる [Omura,Tobe,Tsumura '15])
- ★ うまくいく 1 例は、次の次にトークする福田さんらの仕事 [1507.02483]

- **Spin 1 ($W' \rightarrow WZ, Z' \rightarrow WW$)**

- ★ 電弱対称性を拡張すれば簡単にできる (例: $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$)
- ★ 模型はたくさん作れる (choice of Higgs and fermion sectors)
 - * 背後にダイナミクスがある模型 (1 例は松崎さんのトーク)
 - * Left-Right 模型
 - * その他

- **Spin 2**

- ★ 複合粒子? 余剰次元?

spin 別の特徴 (私見)

- Spin 0 ($S \rightarrow WW, S \rightarrow ZZ$)

- ★ 素朴には断面積が足りない
- ★ 適当な模型だとうまくいかない (例えば $K^0\text{-}\bar{K}^0$ とかにひっかかる)
- ★ うまくいく 1 例は、福田さんトークでどうぞ

spin 1 に着目します

- Spin 1 ($W' \rightarrow WZ, Z' \rightarrow WW$)

- ★ 電弱対称性を拡張すれば簡単にできる (例: $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$)
- ★ 模型はたくさん作れる (choice of Higgs and fermion sectors)
 - * 背後にダイナミクスがある模型 (1 例は松崎さんのトーク)
 - * Left-Right 模型
 - * その他

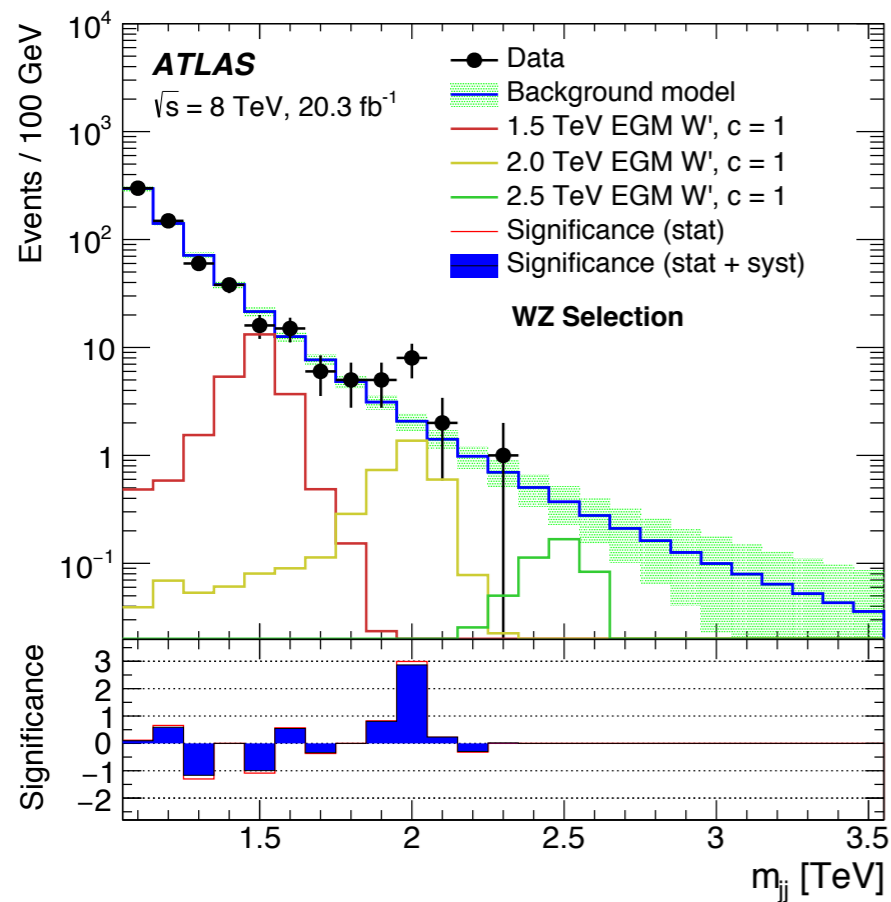
- Spin 2

- ★ 複合粒子? 余剰次元?

$\sigma(pp \rightarrow W'/Z' \rightarrow WZ/WW)$ の見積もり

- **excess の説明に必要な断面積は？**
- **ATLASからの official な値は無い**
- **W'/Z' を用いた論文は数十本あるが、論文によって excess に必要とされる断面積の値は違う**
 - ★ 20 fb
 - ★ 15 fb
 - ★ 10 fb
 - ★ 6 fb
- **断面積をどう見積もるかによって答えは大きく変わる σ**
 - ★ 統計が足りていないのが原因と考えられる
 - ★ とりあえず 3例あげます

$\sigma(pp \rightarrow W'/Z' \rightarrow WZ/WW)$ の見積もり



BGをさっぴく

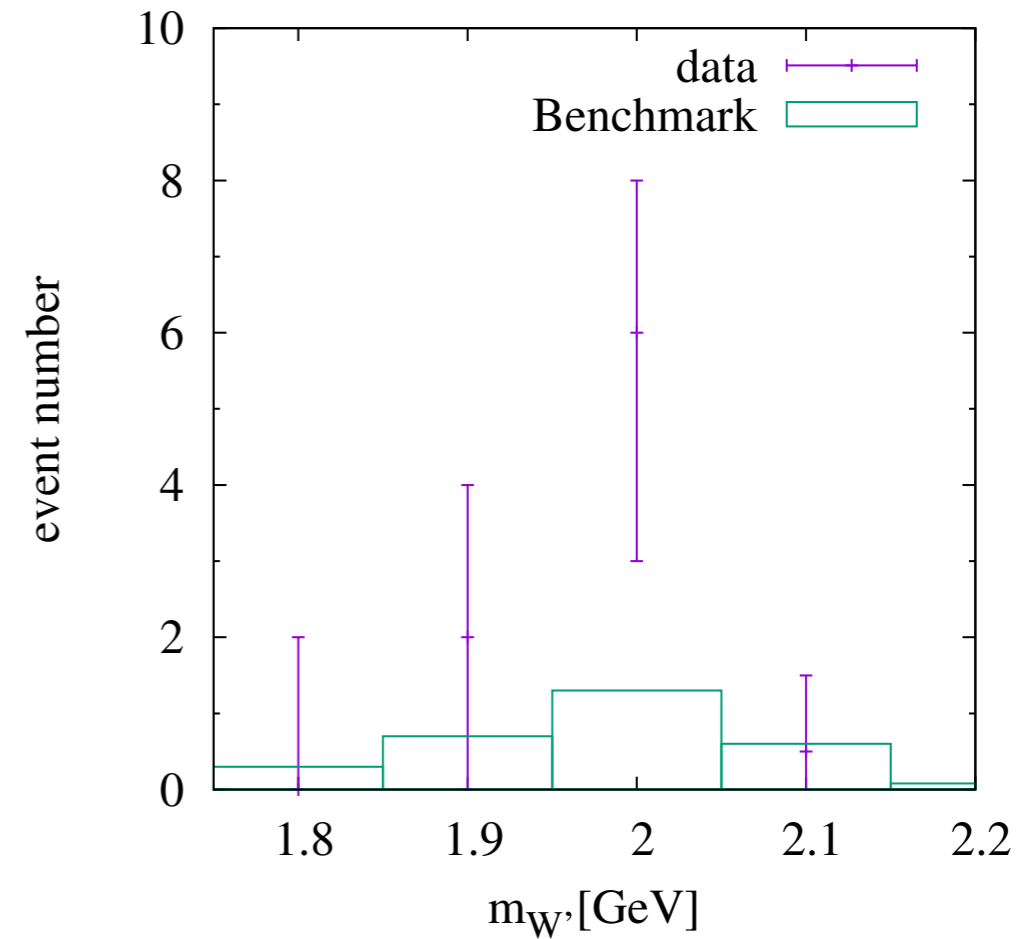
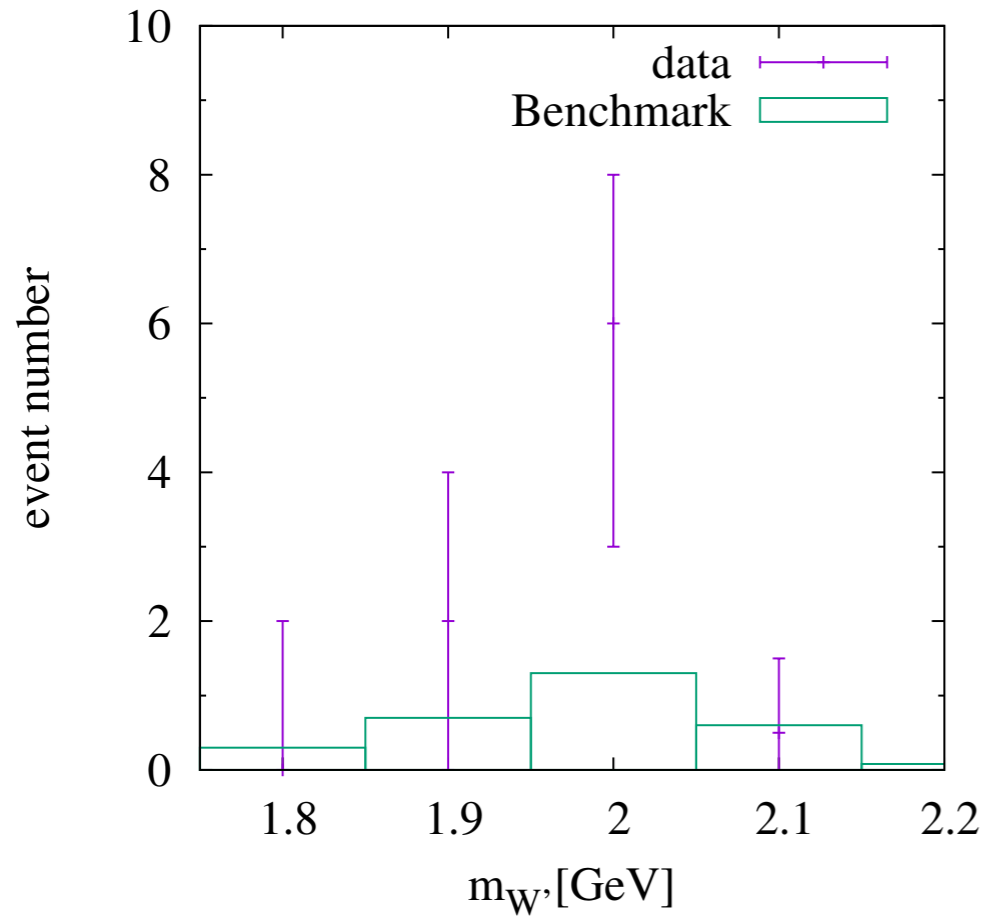


Fig. from ATLAS EXOT-2013-008

estimate(1) 2TeV bin だけ

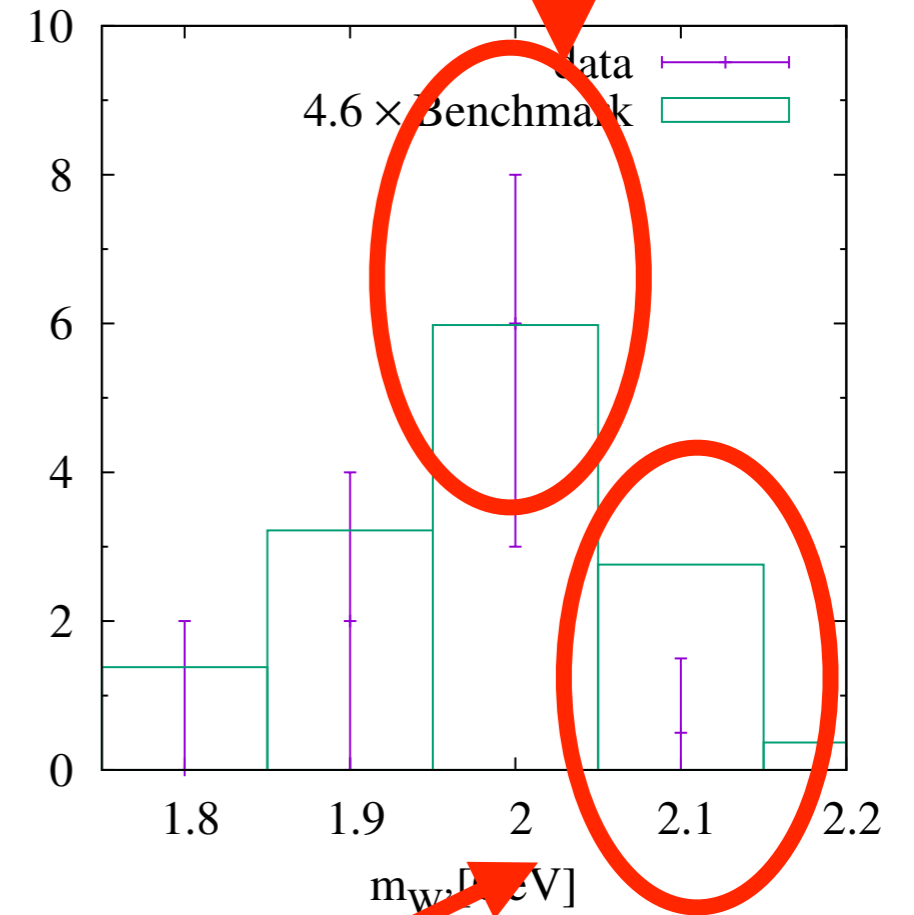


2TeV の bin だけみると



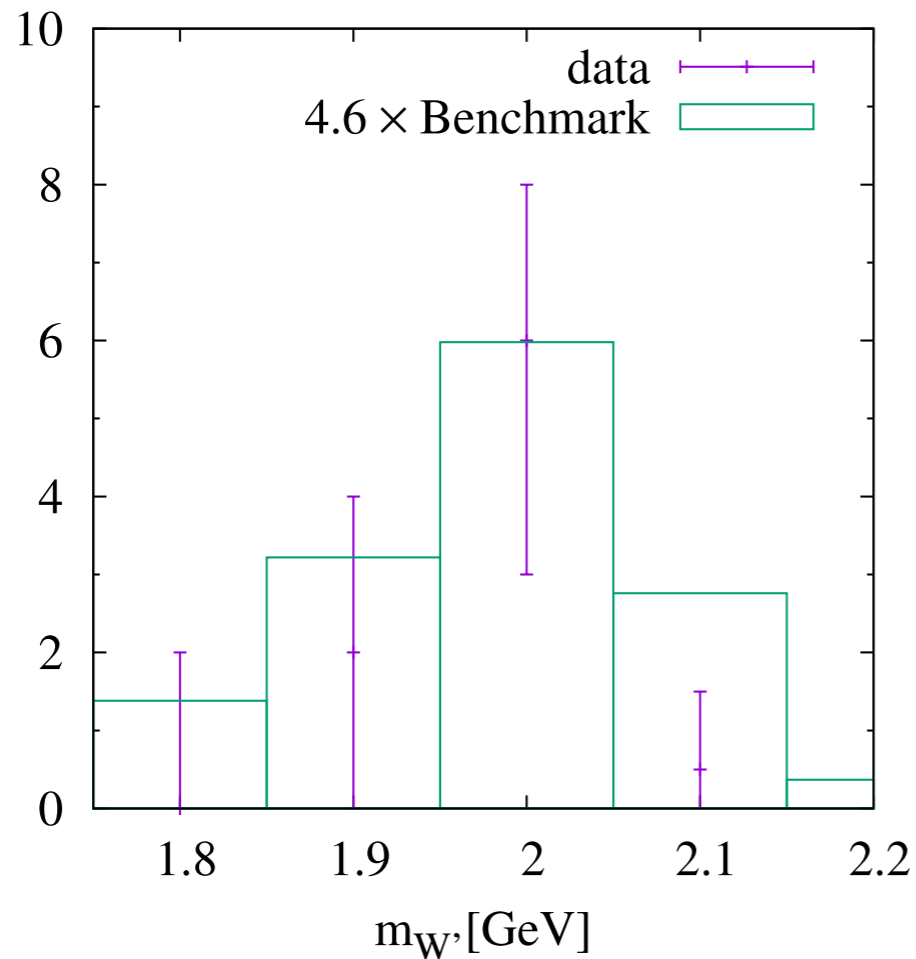
excess説明に必要な断面積
 $3\text{fb} \times 4.6 = \mathbf{14\text{fb}}$

ピッタリ合わす必要も無い

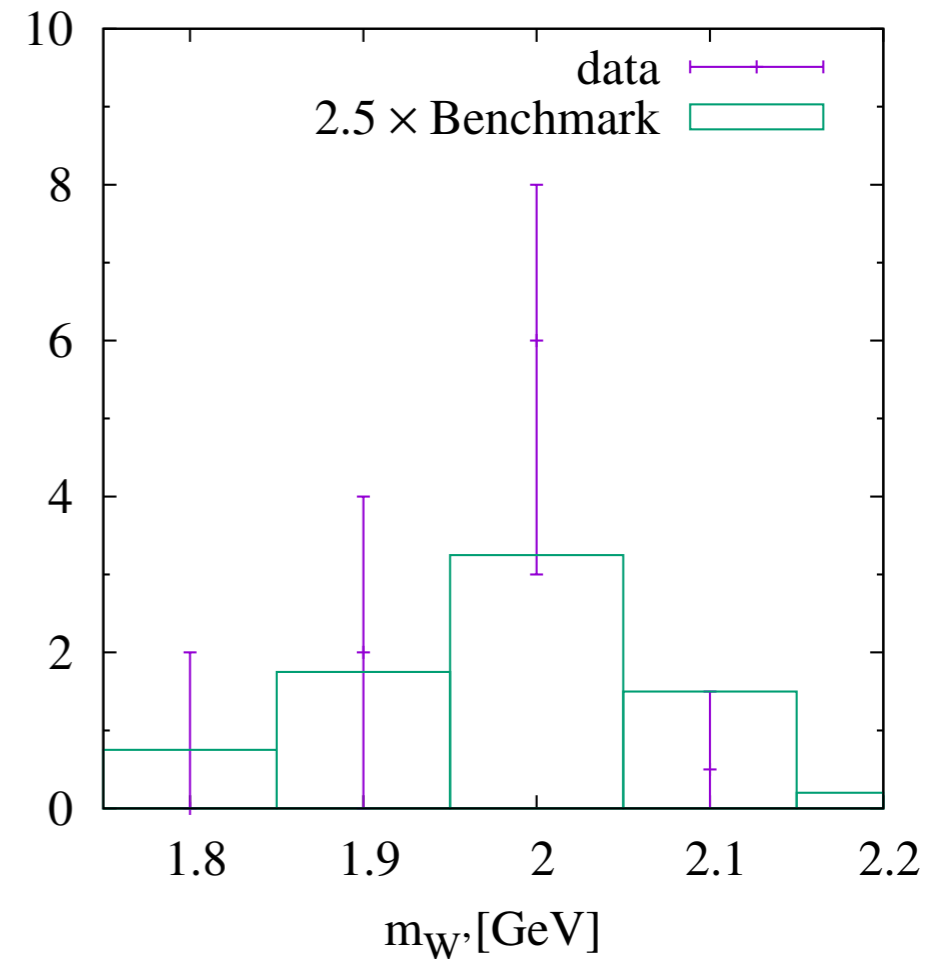


あまり合っていないように見える...

estimate(2) 全部 error bar に入るようにしてみる



2TeV bin だけ見た場合：
excess説明に必要な断面積
 $3\text{fb} \times 4.6 = \mathbf{14\text{fb}}$

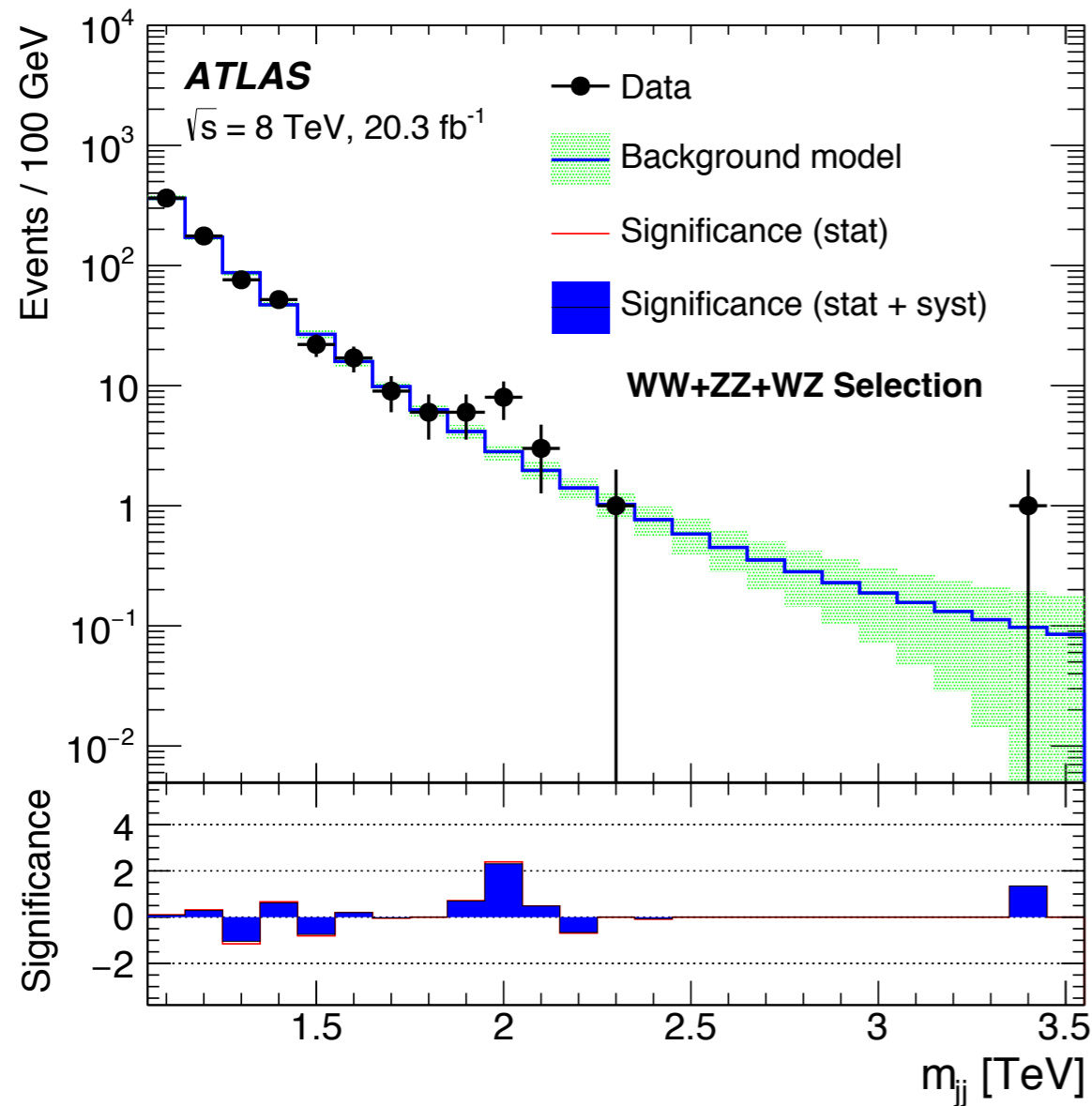


error bar に入れた場合：
excess説明に必要な断面積
 $3\text{fb} \times 2.5 = \mathbf{7.5\text{fb}}$



だいぶ違う

estimate(3) event 数だけ数える



● WW+WZ+ZZ selection

- ★ 2 events at 1.9 TeV bin
- ★ 5 events at 2.0 TeV bin
- ★ 1 event at 2.1 TeV bin
- ★ # of excess event = 8

- ★ # = $\sigma \times \text{Luminosity} \times \text{efficiency}$
- ★ $\sigma(pp \rightarrow W' \rightarrow WZ) + \sigma(pp \rightarrow Z' \rightarrow WW) \sim 6 \text{ fb}$

Fig. from ATLAS EXOT-2013-008

$\sigma(pp \rightarrow W'/Z' \rightarrow WZ/WW)$ の見積もり

- ATLASからの official な値は無い
- どう見積もるかによって答えは大きく変わる
 - ★ 10 fb 程度あればいいだろう
 - ★ 最低でも 6 fb は欲しい
- ところで $\sigma(pp \rightarrow V' \rightarrow Vh) < 7\text{fb}$ [CMS EXO-14-009]
 - ★ 摂動論的ユニタリティーを満たすモデルでは
$$\sigma(pp \rightarrow V' \rightarrow VZ) \sim \sigma(pp \rightarrow V' \rightarrow Vh)$$
となるので、この制限はきつい
- (私見) 6fb を目指して、それ以上は新しい実験結果が出てから考えれば良い

残りの時間で話したいこと

- **spin 1 模型を1つとりあげます**

- ★ くりこみ可能で摂動論の範囲内で取り扱える模型のうち**最も簡素な模型**
- ★ (非摂動論的な模型は、次のスピーカーの松崎さん)
- ★ (模型によらない性質は、明日のポスター発表で長井さん)

- **$pp \rightarrow W' \rightarrow WZ \rightarrow \text{jets}$ モードの LHC run-2 での展望**

- ★ 7fb-1 くらいで W'/Z' 模型は排除可能

model

模型セツトアップ

TA and Kitano '13

- $SU(2)_0 \times SU(2)_1 \times U(1)_2 \rightarrow U(1)_{\text{QED}}$

- **three Higgs doublets**

- ★ $H_1 : SU(2)_0 \times SU(2)_1 \rightarrow SU(2)_V$

- ★ $H_2 : SU(2)_1 \times U(1)_2 \rightarrow U(1)_V$

- ★ $H_3 : SU(2)_0 \times U(1)_2 \rightarrow U(1)_V$

- ★ 12個の実スカラー (6つはゲージ場に食われる)

- ★ 結果、物理的自由度は6つ (3 CP-even + 1 CP-odd + 1 pair of charged Higgs)

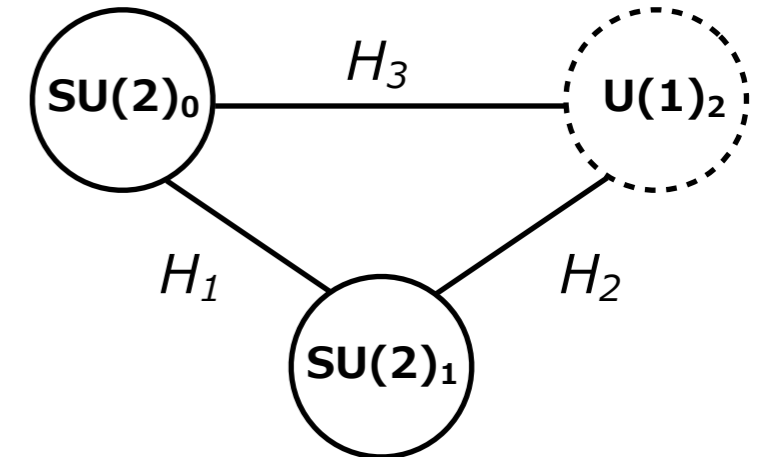
- **フェルミオン**

- ★ $\psi_L : (SU(2)_0, SU(2)_1, U(1)_2) = (2, 1, 1/6) \text{ or } (2, 1, -1/2)$

- ★ $\psi_R : (SU(2)_0, SU(2)_1, U(1)_2) = (1, 1, Q_{\text{QED}})$

- ★ 湯川相互作用は H_3 で与えられる

schematic picture (moose notation)



$$\mathcal{L}^{\text{Yukawa}} = - \bar{Q}^i H_3 \begin{pmatrix} y_u^{ij} & 0 \\ 0 & y_d^{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_R^j \\ d_R^j \end{pmatrix} + (h.c.) + (\text{lepton sector})$$

模型のパラメータ

- 13 パラメータ

- ★ 既知のパラメータ4つ: $v, \alpha, m_Z, m_h,$

- ★ 未知のパラメータ4つ: $m_{Z'}, m_{H'}, m_H, m_A,$

- ★ カップリング3つ: $\kappa_F, \kappa_Z, g_{WW'H'}$ ($\kappa_F = g_{hff}/g_{hff}^{SM}, \kappa_Z = g_{hzz}/g_{hzz}^{SM}$)

- ★ vev関連2つ: $r, v_3,$ ($r = v_2/v_1$)

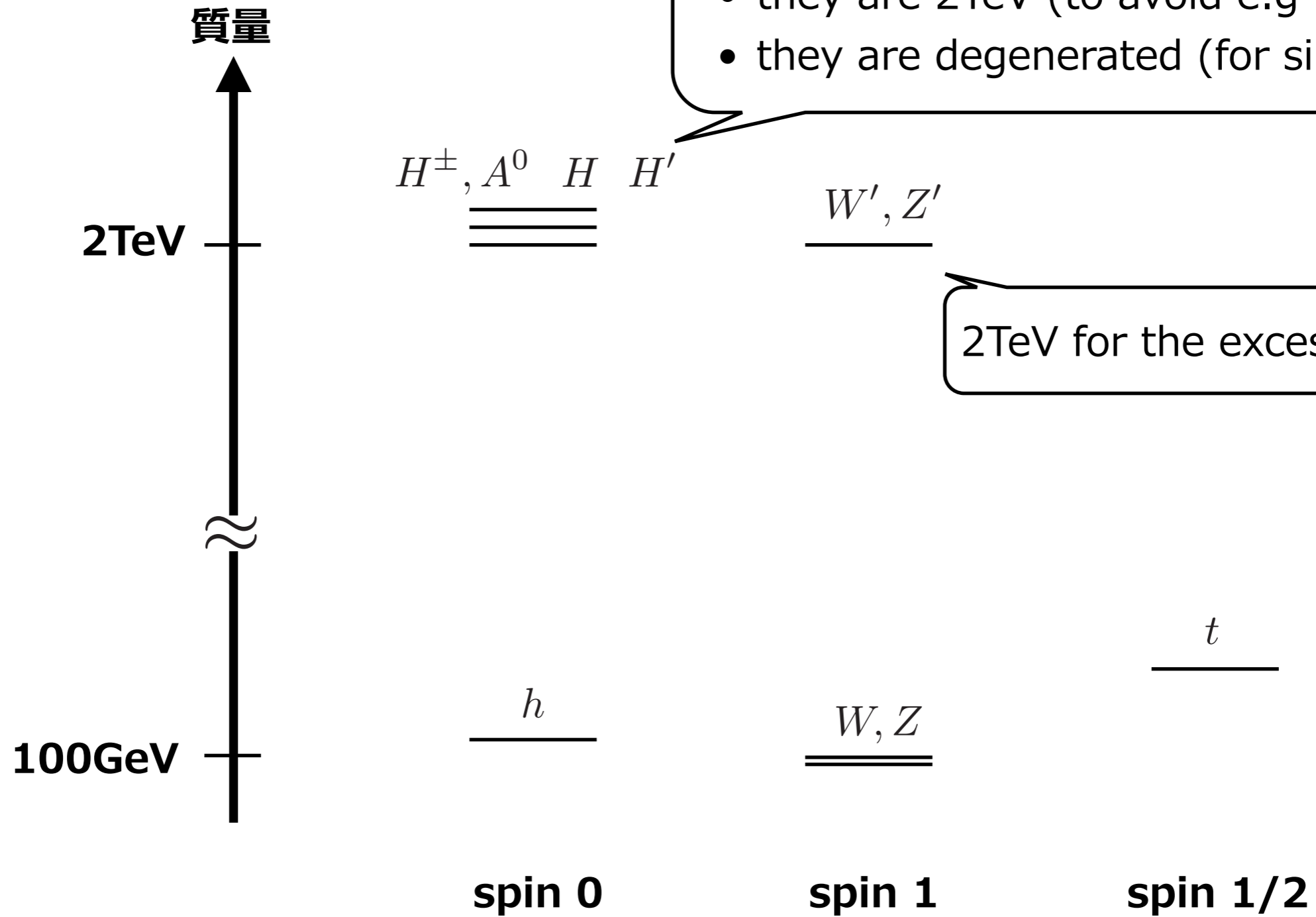
- 簡単のため以下では質量とカップリングは固定

- ★ $m_H = m_{H'} = m_A = 2\text{TeV}$

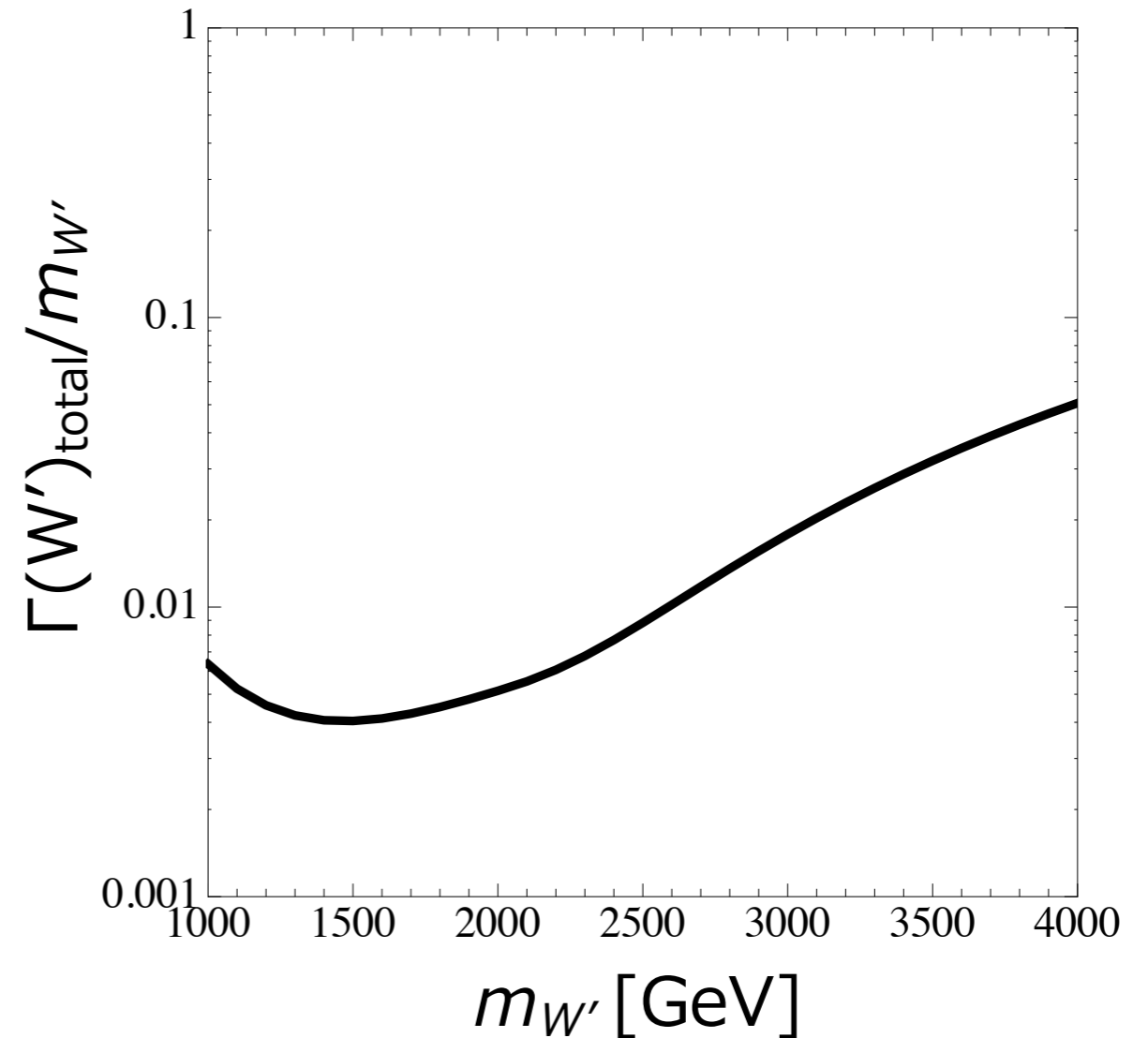
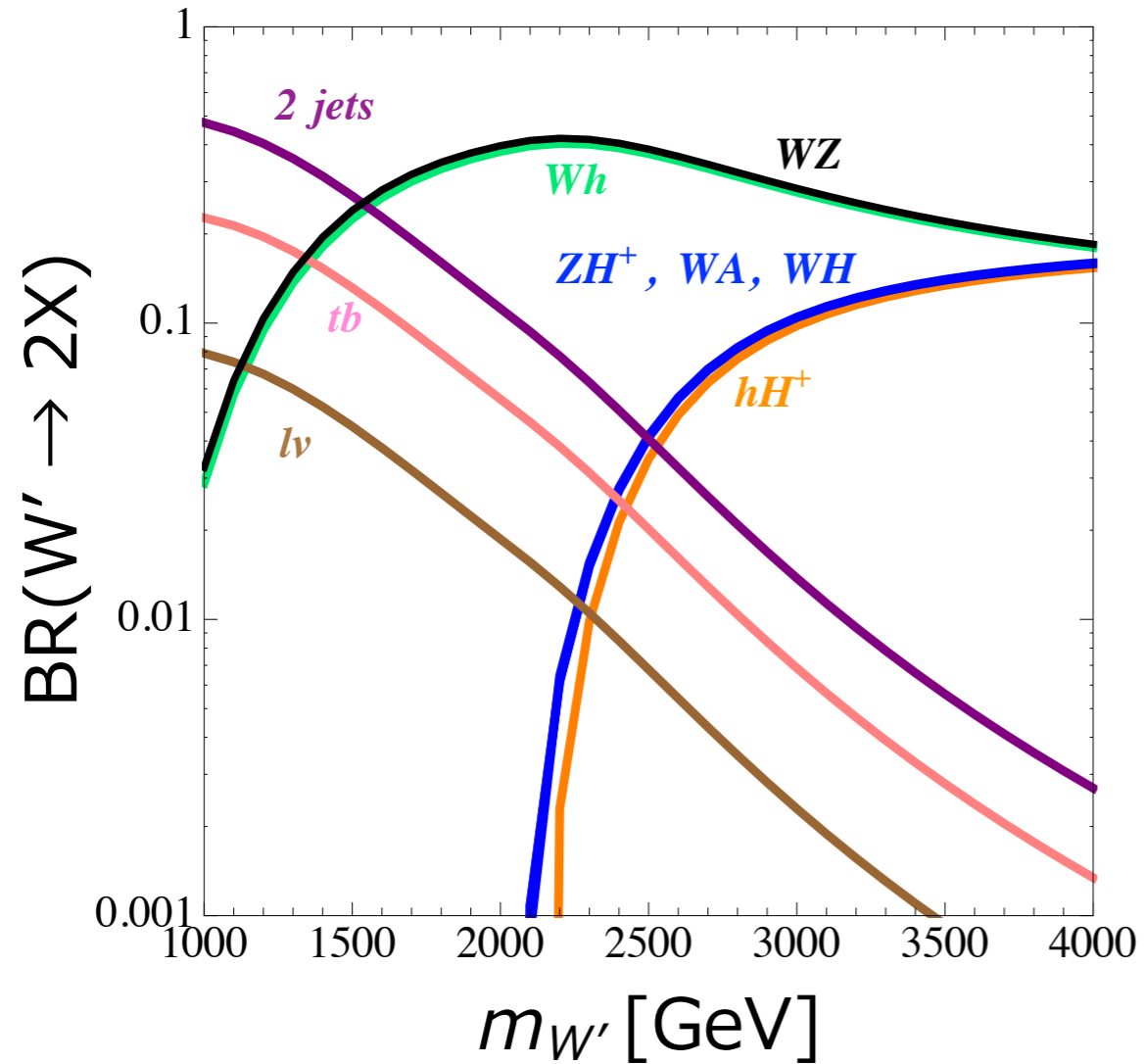
- ★ $\kappa_F = 1, \kappa_Z \sim 1, g_{WW'H'} = 0$

- (r, v_3) の2つをパラメータとしてふる

粒子の質量

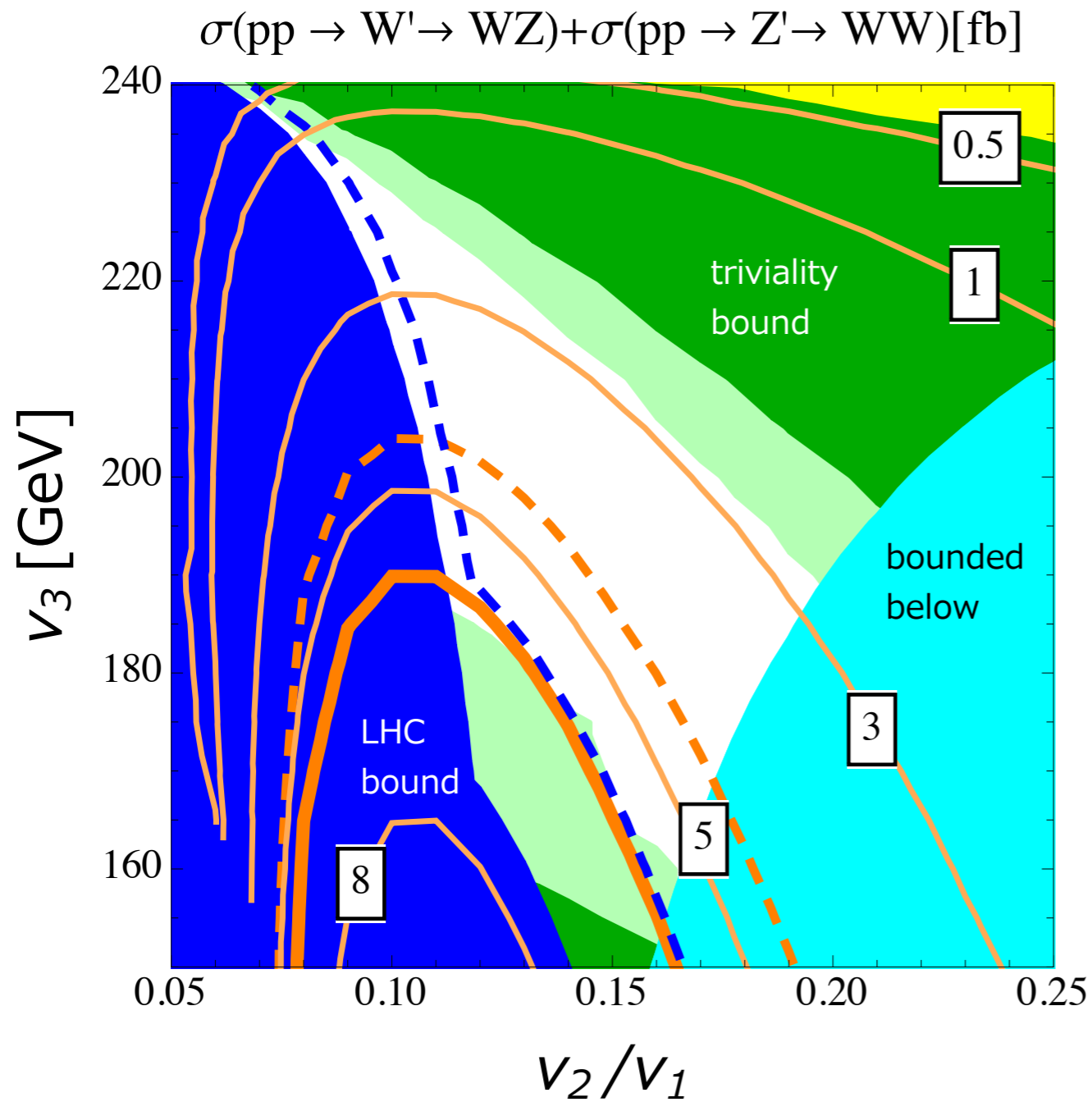


W' branching ratio and width



- ★ $m_H = m_{H'} = m_A = 2\text{TeV}$
- ★ width is narrow (20 GeV for $m_{W'} = 2\text{TeV}$)

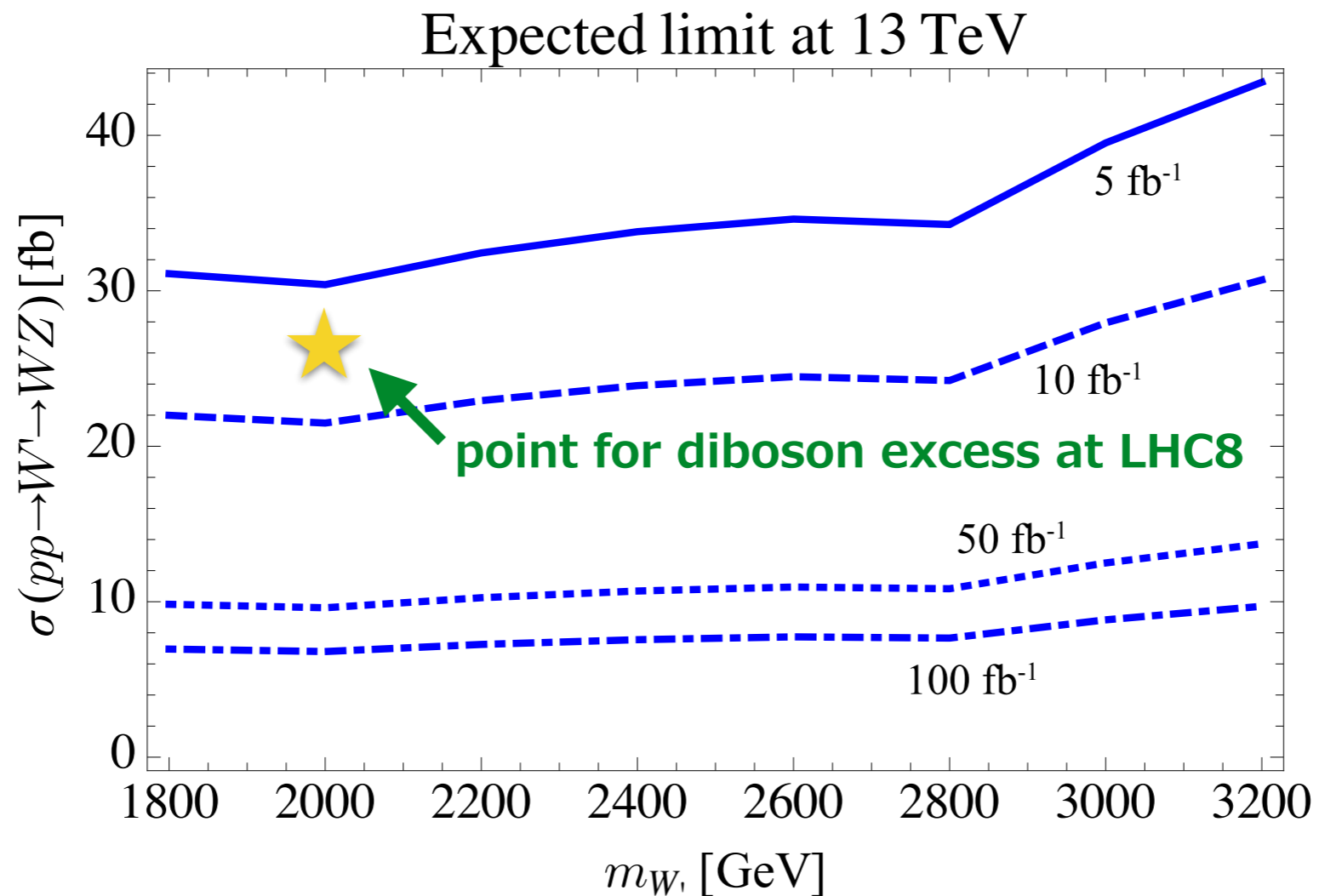
results



- ★ colored region is excluded
- ★ orange lines are σ
- ★ $\sigma > 7$ fb is exclude by $V' \rightarrow Vh$
- ★ $\sigma = 6$ fb on bold orange line (possibly explain the excess)
- ★ dashed lines are with K-factor ($K \sim 1.3$) 0711.0749, 1410.4692

prospect for LHC run-2

95% exclusion limit at LHC run-2



- ★ $WZ \rightarrow$ hadrons
- ★ W' width = 25GeV
- ★ model independent result (as long as width is narrow)

Summary

まとめ

- **2TeV 付近に diboson excess があります by the ATLAS**
 - ★ CMS には excess 無し
 - ★ レプトンを含む diboson の崩壊モードには excess 無し
 - ★ nice exercise to consider BSM
- **模型を1つ紹介した (W' and Z')**
 - ★ くりこみ可能で摂動論の範囲内で取り扱える模型のうち**最も簡素な模型**
 - ★ $\sigma(pp \rightarrow V' \rightarrow lv)$ と $\sigma(pp \rightarrow V' \rightarrow Vh)$ が制限
 - ★ $\sigma(pp \rightarrow V' \rightarrow VV) = 6 \text{ fb}$ は可能
- **prospect for LHC run-2**
 - ★ 2TeV excess を W'/Z' で説明する可能性は、 7 fb^{-1} で95%以上で排除できる

Backup slides

Monte Carlo part

What we did in MC part

- **Monte Carlo**

- ★ QCD dijet as BG ($1.73 \cdot 10^6 \sim 5\text{fb}^{-1}$, $E_{\text{CM}} > 1\text{TeV}$, $p_{\text{T}} > 400\text{GeV}$, $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$) by PYTHIA8.205
- ★ signal ($pp \rightarrow W' \rightarrow WZ$) $m_{W'} = 1.8\text{TeV}$ to 3.2TeV , width = 25GeV
- ★ Tune 4C for fragmentation and hadronization
- ★ detector simulator DeLPHES3 is modified using FastJet3
- ★ cuts: same as the cuts used by ATLAS

- **Our MC result**

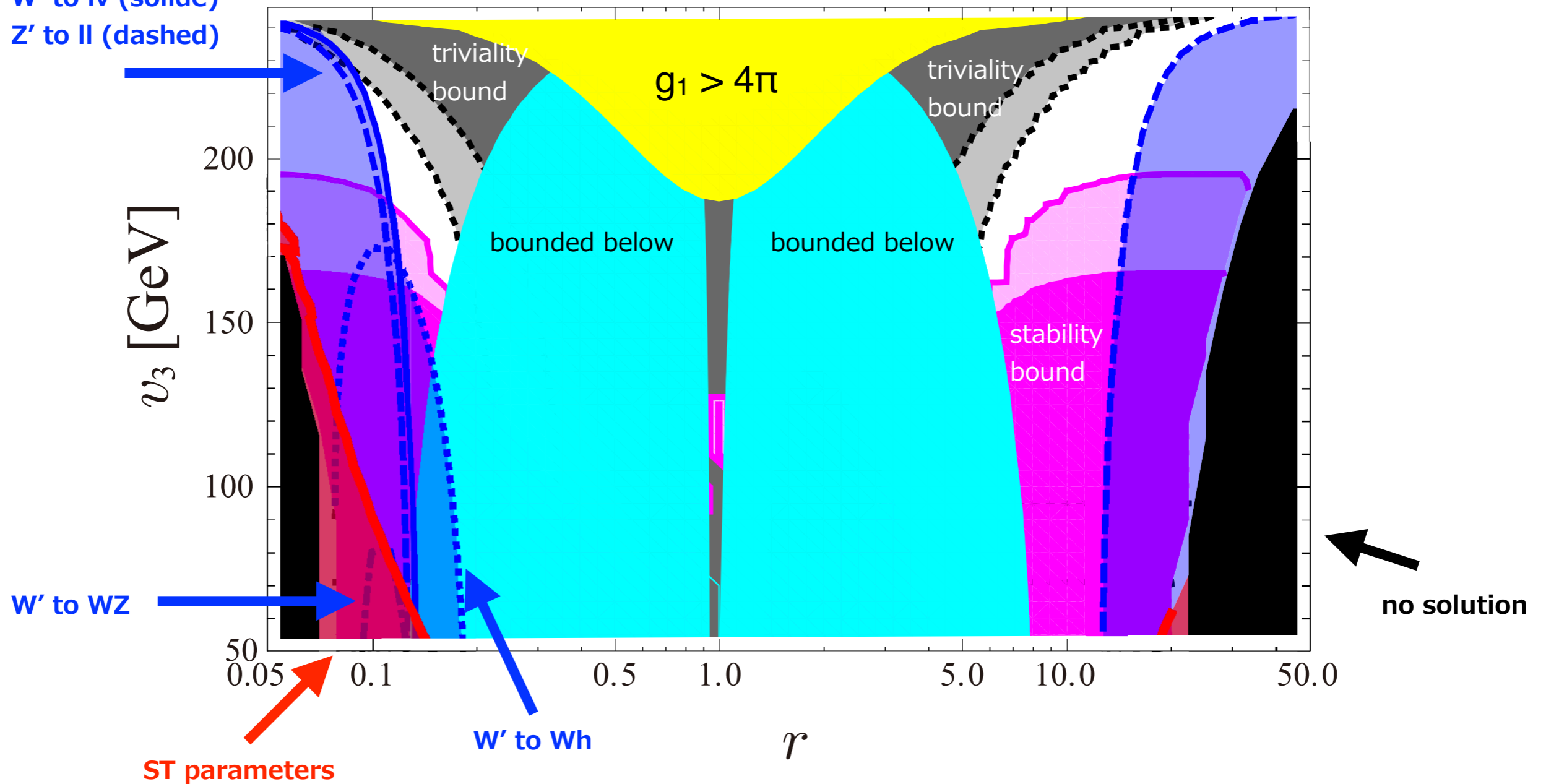
- ★ we checked signal distributions agree with the ATLAS result (8TeV)
- ★ we found # of back ground is twice of the ATLAS result (8TeV)
- ★ we scale our BG 1/2 for 13TeV analysis

More on our model

constraint on (r, v_3) -plane

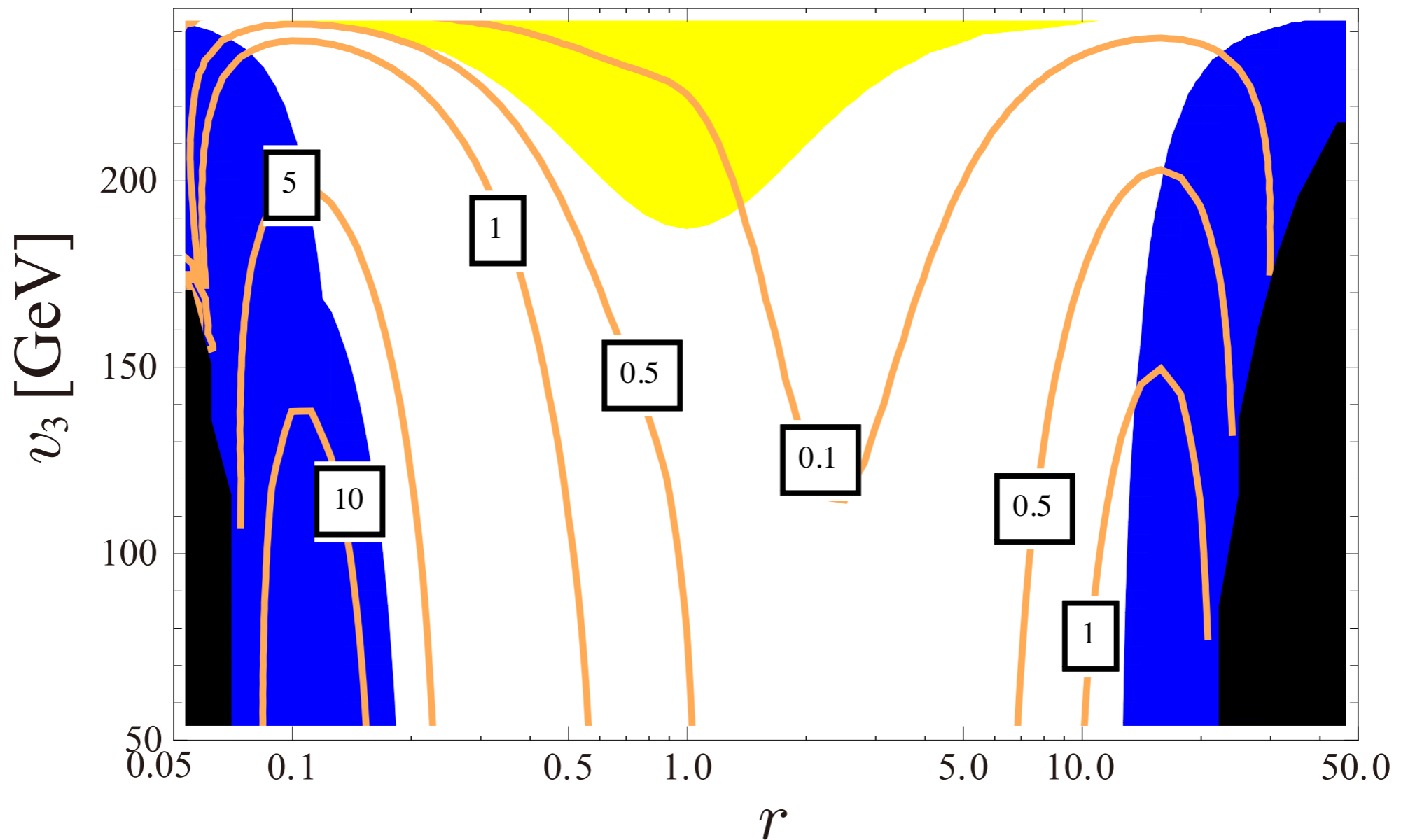
$$m_{Z'} = m_{heavy\ Higgs} = 2\ \text{TeV}, \kappa_F = 1.00$$

W' to $l\nu$ (solid)
 Z' to ll (dashed)



$\sigma(pp \rightarrow W' \rightarrow WZ) + \sigma(pp \rightarrow Z' \rightarrow WW)$ [fb]

$$m_{Z'} = m_{\text{heavy Higgs}} = 2 \text{ TeV}, \kappa_F = 1.00$$



★ $\sigma > 5\text{fb}$ for small r region