基研研究会「素粒子物理学の進展2013」
2013年8月7日

LHC Non-SUSY BSM 探索の現状と展望

寺師 弘二

東京大学 素粒子物理国際研究センター

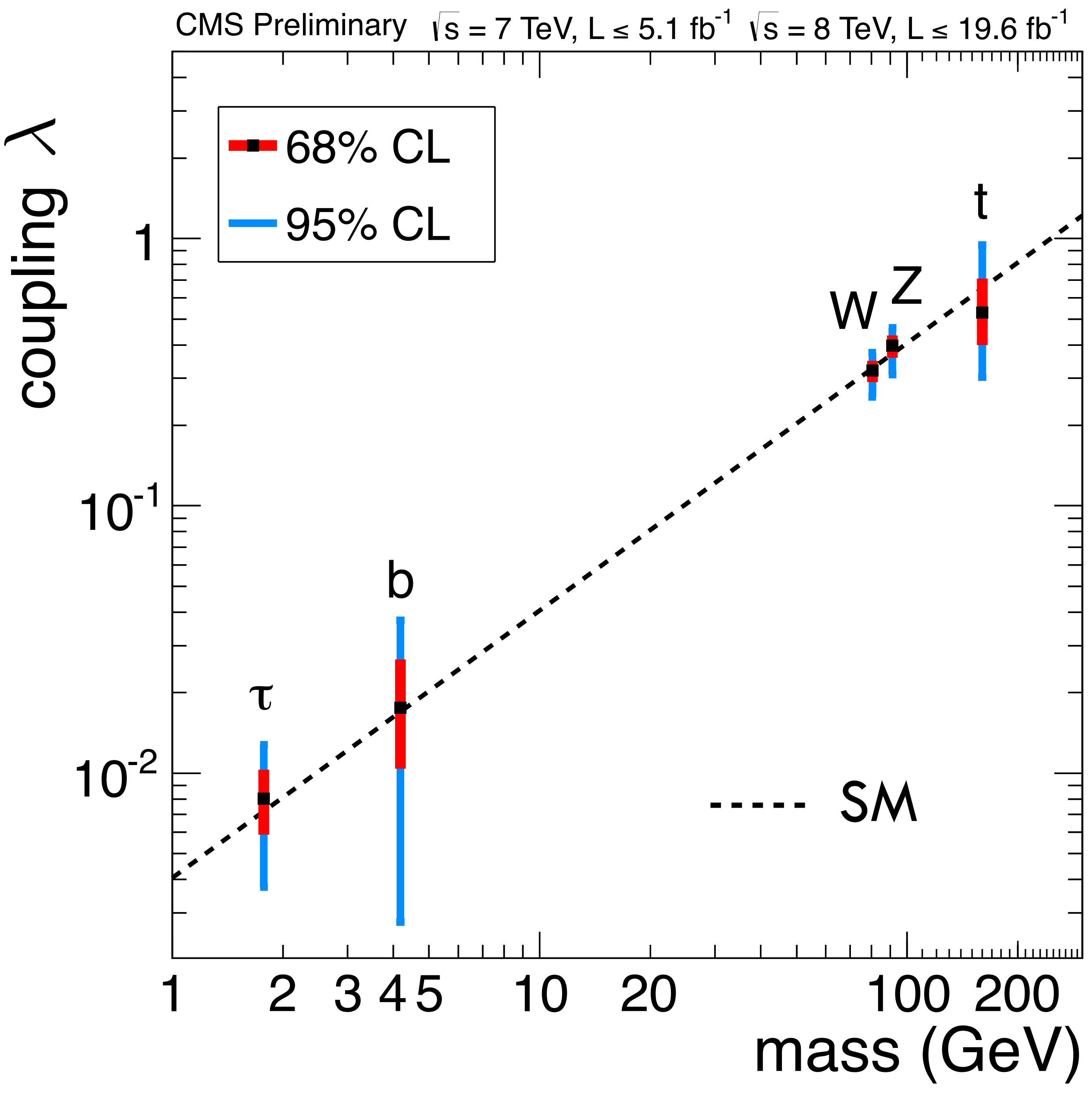
“Higgs” Discovery

ヒッグス粒子が発見された!!

- H → γγ, WW, ZZ, ττ(?)を確認
- VBF生成も確認
- 断面積はSMヒッグスと無矛盾
- スピン・結合定数もSMヒッグスと無矛盾
  (というか良く合っている)

結合定数と質量がほぼ比例している

→ Electroweak Symmetry Breakingと関係がある!!

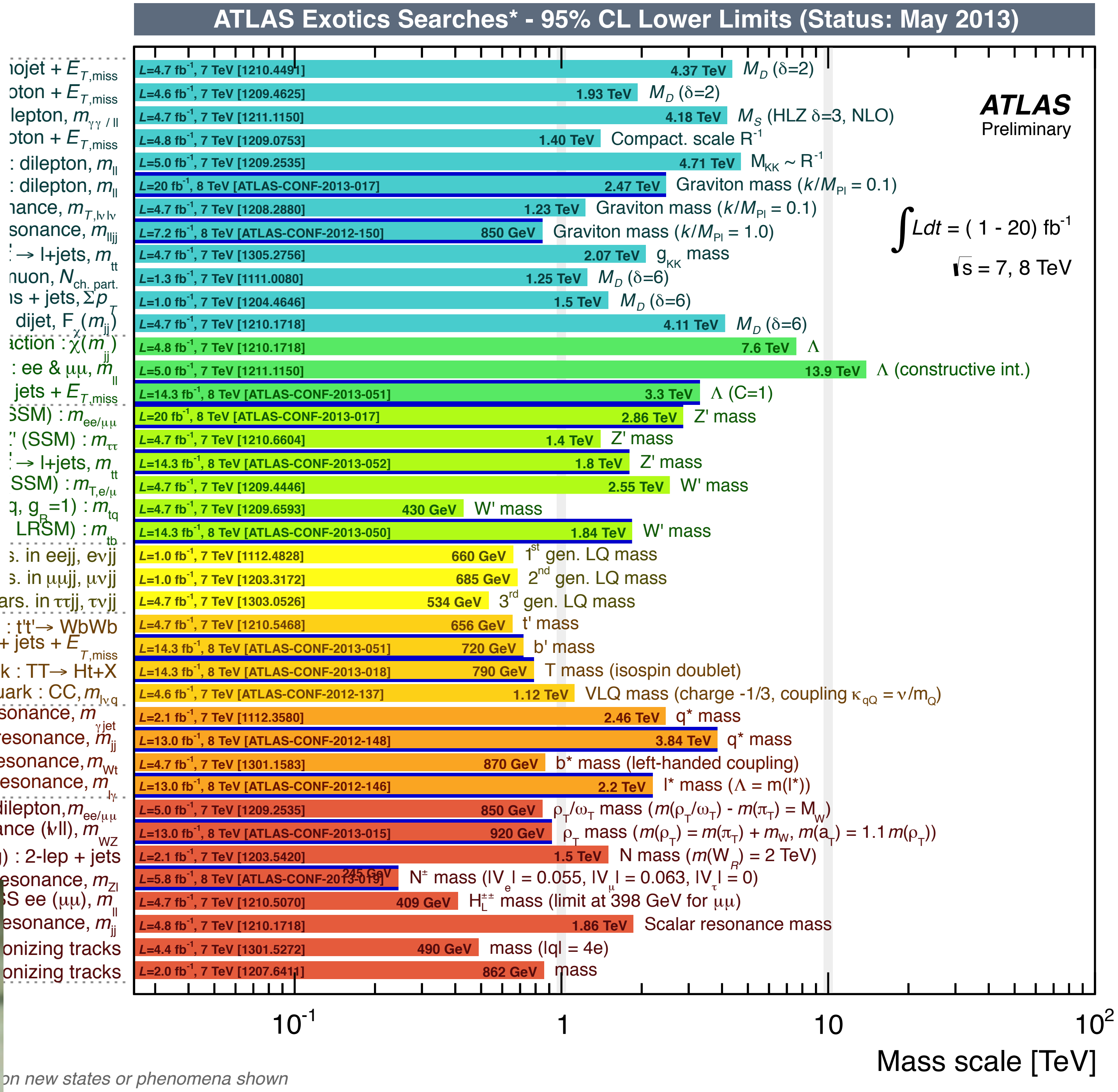


“Higgs” Discovery

ヒッグス粒子が発見された!!

- H → γγ, WW, ZZ, ττ(?)を確認
- VBF生成も確認
- 断面積はSMヒッグスと無矛盾
- スピン・結合定数もSMヒッグスと無矛盾

（というか良く合っている）



が、ヒッグス以外にはSUSYも何も見えていない。。。

“Higgs” Discovery

ヒッグス粒子が発見された!!

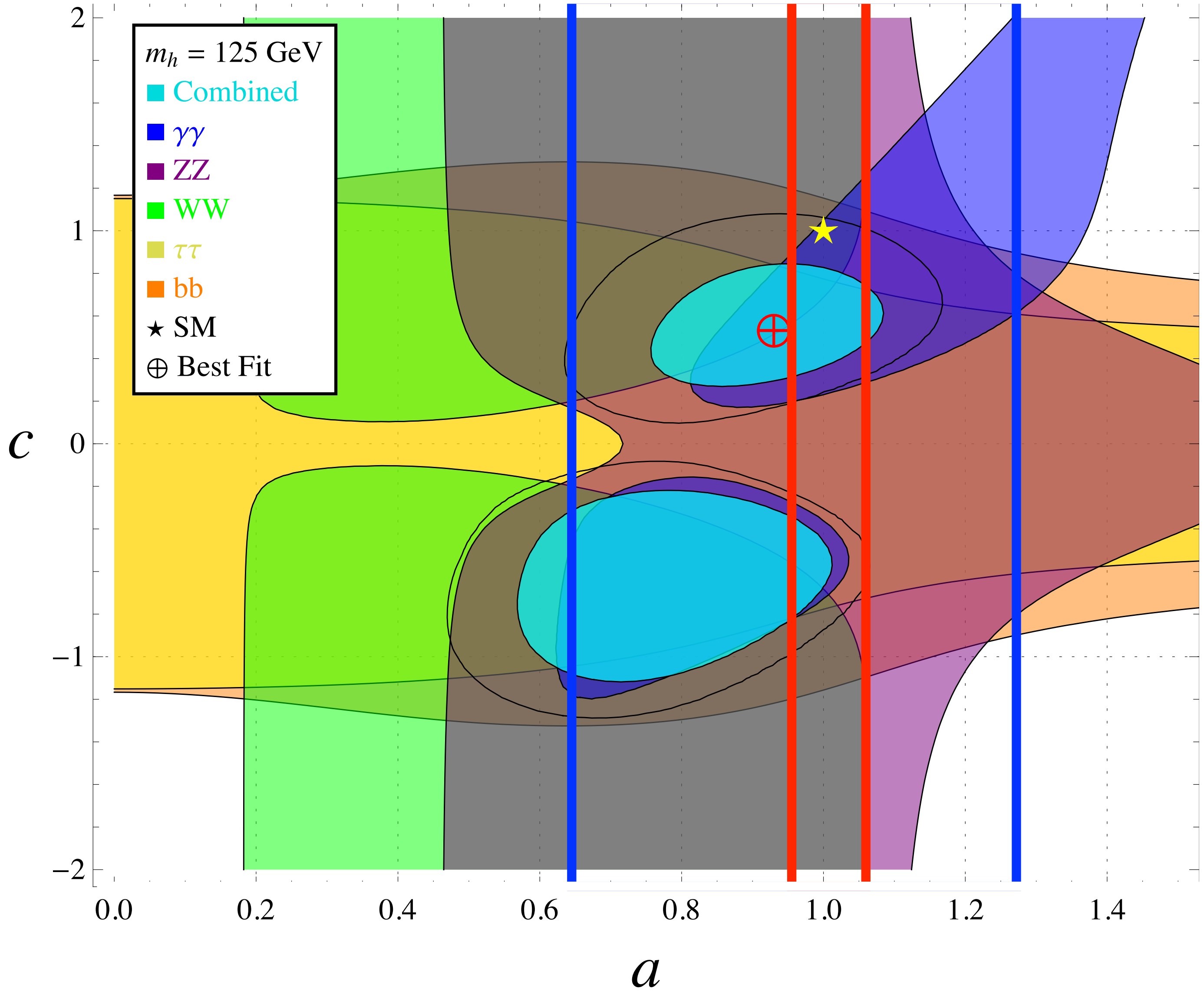
- H ➞ γγ, WW, ZZ, ττ(?)を確認
- VBF生成も確認
- 断面積はSMヒッグスと無矛盾
- スピン・結合定数もSMヒッグスと無矛盾
  (というか良く合っている)

が、ヒッグス以外にはSUSYも何も見えていない。。。

新物理が現れるエネルギースケールは高いのかも。。。

$\Lambda_a > 4$ TeV

$\Lambda_a > 10$ TeV



$$\Lambda_a = \frac{4\pi v}{\sqrt{|1-a^2|}}$$

(scale of strong $WW \to WW$)

“Higgs” Discovery

ヒッグス粒子が発見された!!

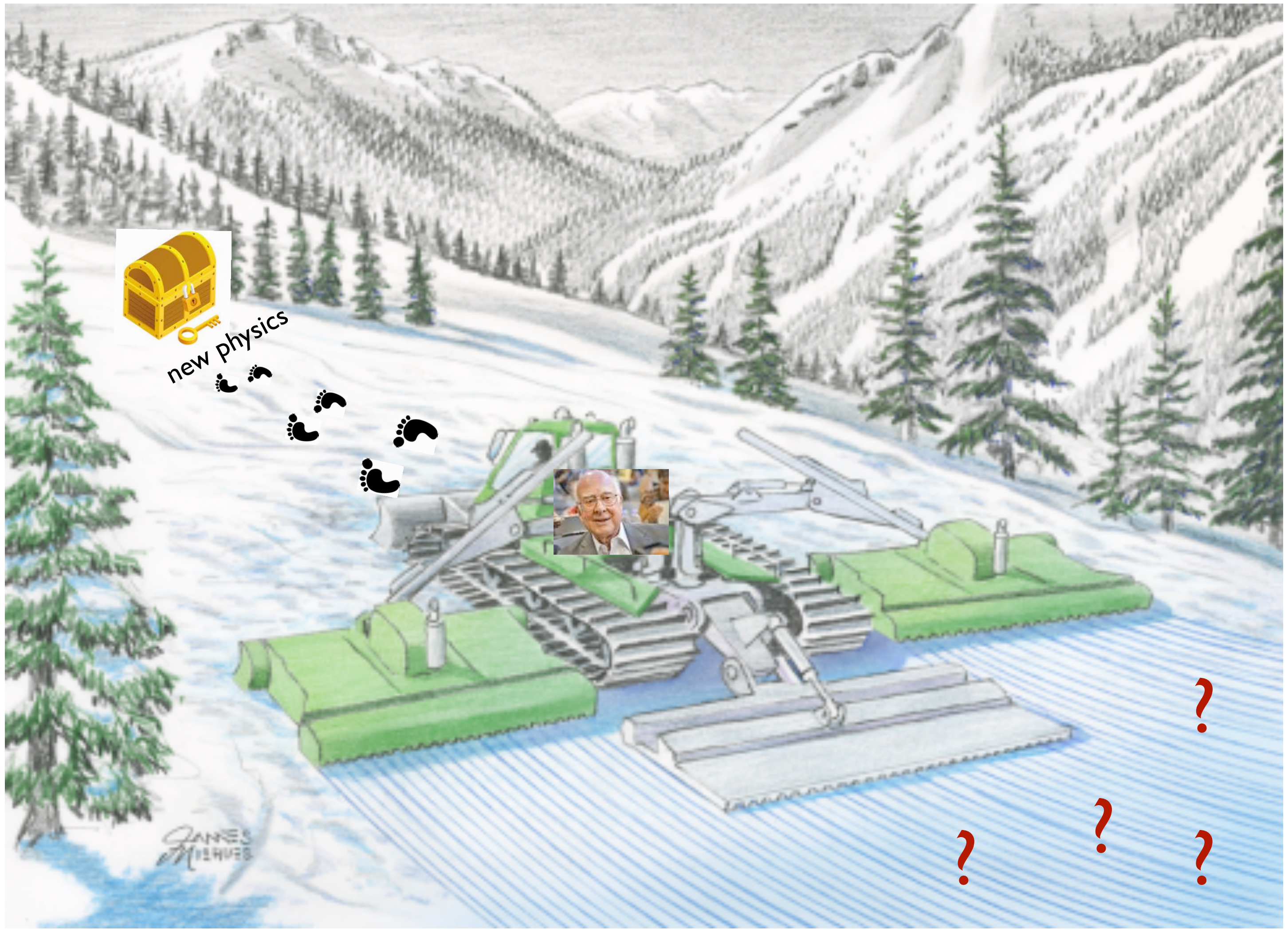
- $H \to \gamma\gamma$, WW, ZZ, $\tau\tau$(?)を確認
- VBF生成も確認
- 断面積はSMヒッグスと無矛盾
- スピン・結合定数もSMヒッグスと無矛盾

  （というか良く合っている）

が、ヒッグス以外にはSUSYも何も見えていない。。。

新物理が現れるエネルギースケールは高いのかも。。。

Les Houches 2013, A Weiler



とは言っても、我々実験屋は探し続けなければならない!!

でも何かヒントは欲しい。。。

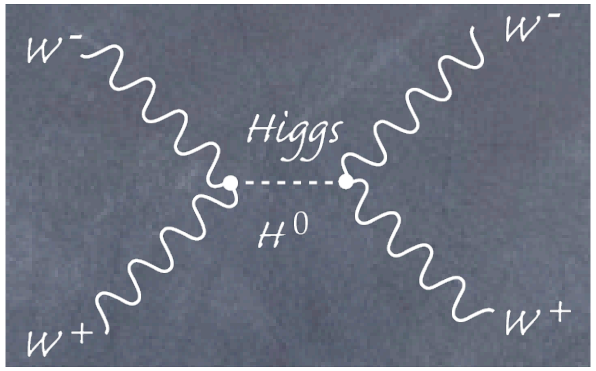
➡ やはりEWSBセクターに何かある？

Elementary vs Composite?

より具体的には

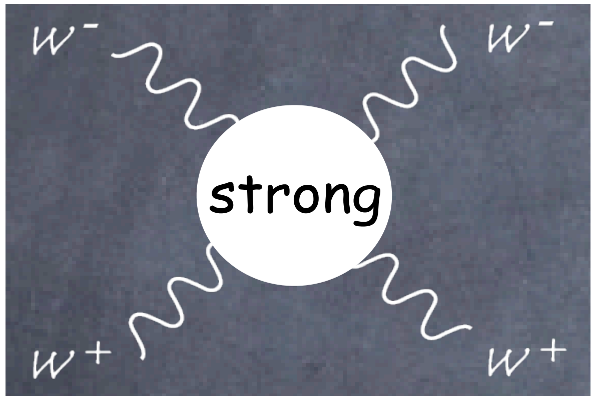
ヒッグスはElementary scaler粒子か？

- Weakly interacting model（SM? SUSY? Others?)
- MSSMだと1%以下のFine-tuningが必要



ヒッグスはComposite粒子か？

- Strongly interacting model（Technicolor? Little Higgs? Others?)
- より基本的な粒子から構成される
  （➡ 新しいゲージ相互作用？）
- Fine-tuningは比較的少ない
- ヒッグス＋ρ共鳴でVV散乱振幅のユニタリティー性はOK



いずれにしろ、ヒッグスの性質測定は非常に大事（➞ 花垣さん）

ヒッグス ≈ Composite粒子？をLHCで直接検証したい。

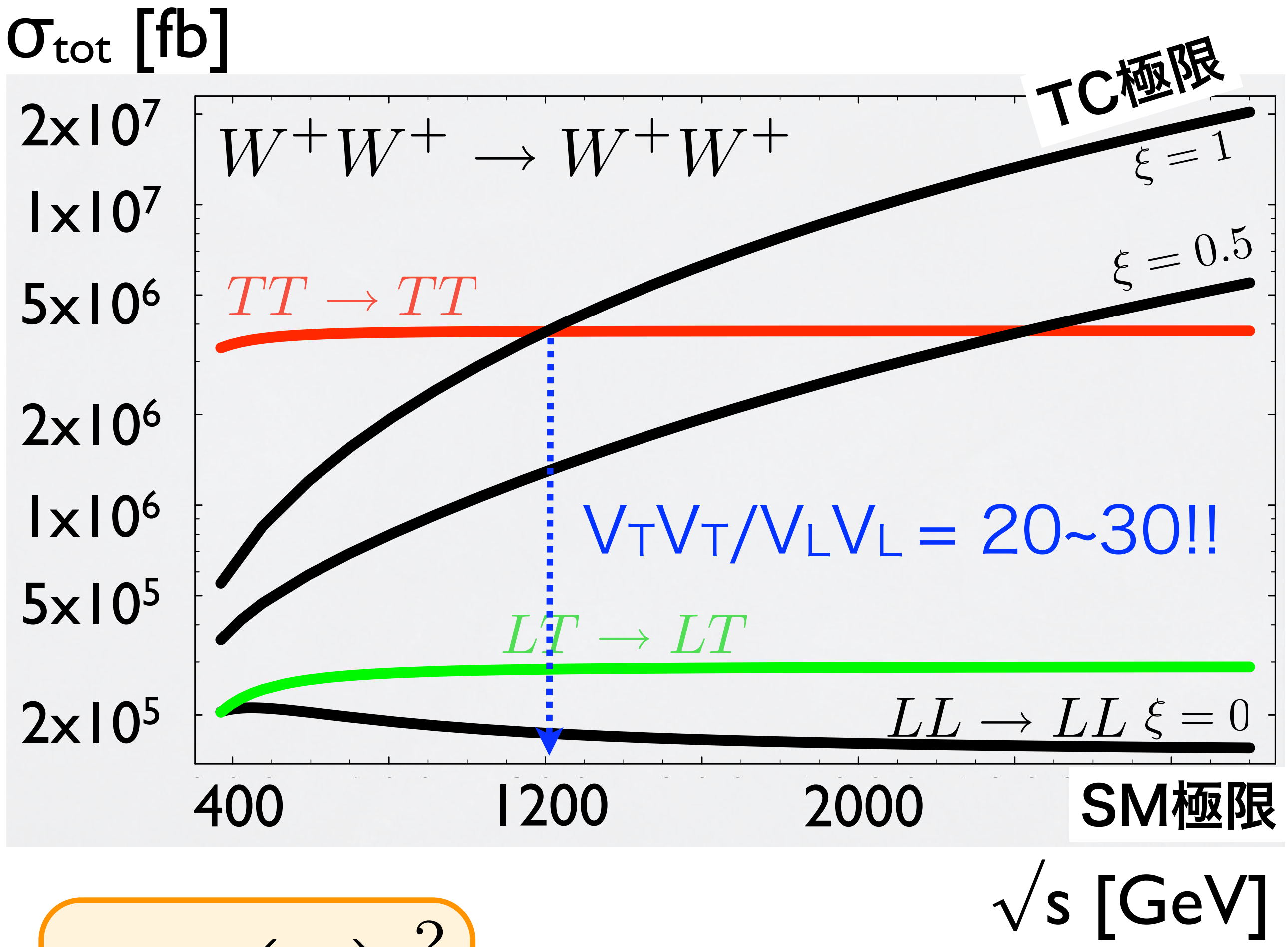
Probing Composite Higgs (I)

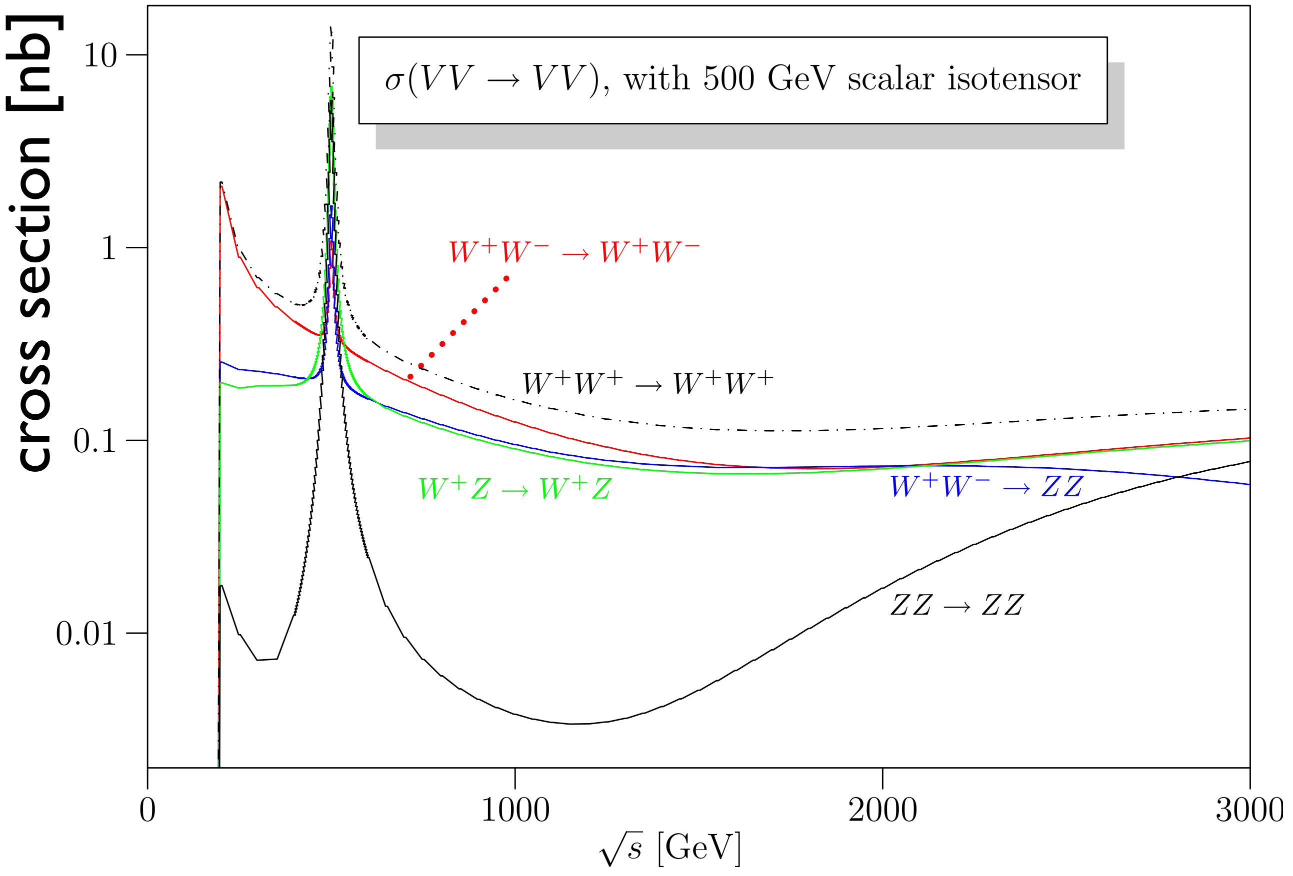
Composite粒子としてのヒッグスを検証できるか？

1) もしCompositeなら、VV散乱振幅に何かヒントが見えるはず。

- SM予想とのずれ？
  → **VV散乱断面積の測定**

- ユニタリティーを回復させる機構がある？
  → **VBSでの共鳴状態の探索**





$$\boxed{\xi = \left(\frac{v}{f}\right)^2}$$

← vev (weak scale)

← strong coupling scale

Probing Composite Higgs (II)

Composite粒子としてのヒッグスを検証できるか？

2) Strongダイナミクスに付随した新粒子が存在するはず。

考える模型に依るが

- **テクニカラー：　Spin-1 ρ共鳴** → WZ, ll, VH, …
- **余剰次元 (RS)：KKグラビトン** → tt, VV, **KKグルーオン** → tt
- **Little Higgs：　t’** → Vq, **W’, Z’** → VH, ll, qq, …

➡ 実験で見える信号としてはどれも良く似ている。
Signature-baseの探索で十分カバーできる。

3) Vector-likeなトップパートナーの存在を示唆する。

“SM”ヒッグスと無矛盾

軽いヒッグス質量を説明できる（→ SMトップの寄与を相殺）

- **例えば、 t’ → Vq (Little Higgs)**

Γ_{Higgs}の測定も良いが、(個人的には)やっぱり直接見えた方が楽しい!!

（→ ハドロン加速器の醍醐味）

Outline

- Resonance (W’, Z’, ρ, g^{KK})
- Vector-like Quark
- Vector Boson Scattering

の３つを中心に、

LHC 7/8 TeVでの直接探索のまとめ

- どういう終状態を見たか？
- どこまで棄却したか？

LHC 13/14 TeVでの感度予想

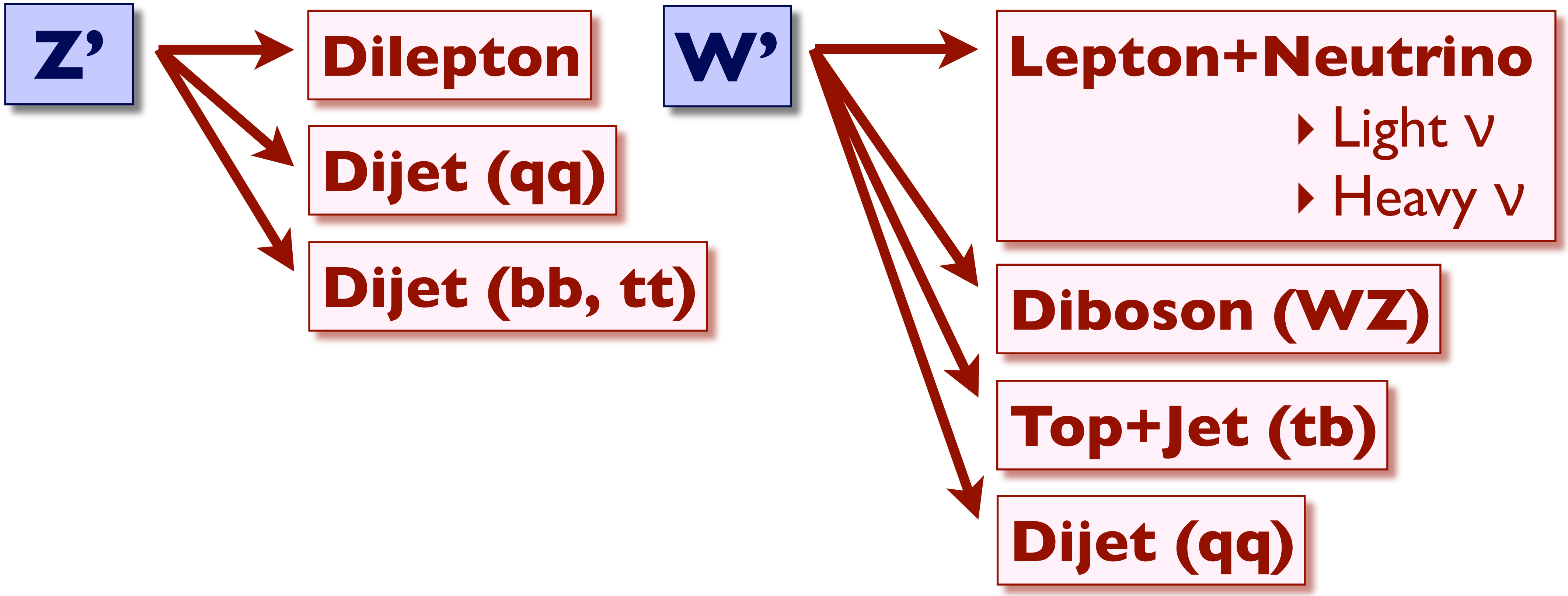
（進行中なので結果があるものだけですが）

を話そうと思います。

Resonance (New Gauge Boson)

New Gauge Boson

- Extension to SM gauge symmetry group $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
  - → U(1)' : neutral (Z') gauge boson
  - → SU(2)' : charged (W') and neutral (Z') gauge bosons
- SM embedded within a larger gauge symmetry group: GUT-E6, SO(10), ...
  - → Charged (W') and neutral (Z') gauge bosons



Z'

Dilepton

Dijet (qq)

Dijet (bb, tt)

W'

Lepton+Neutrino

- Light ν
- Heavy ν

Diboson (WZ)

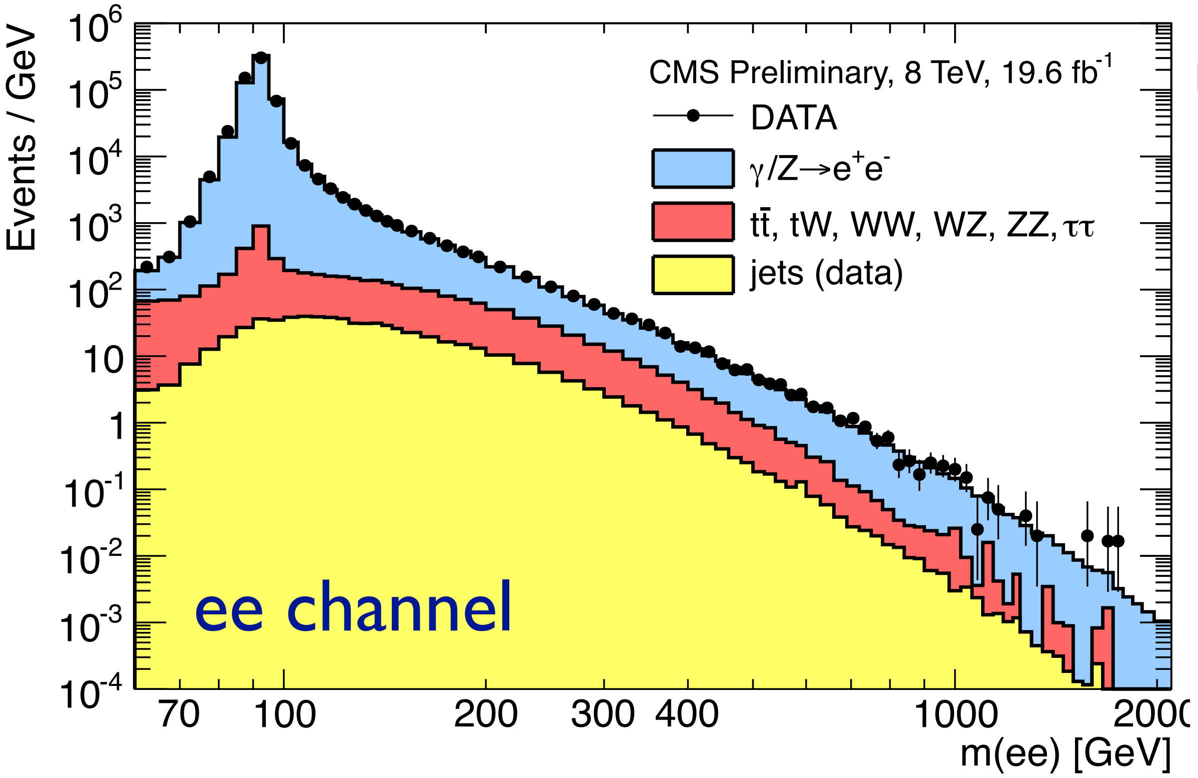
Top+Jet (tb)

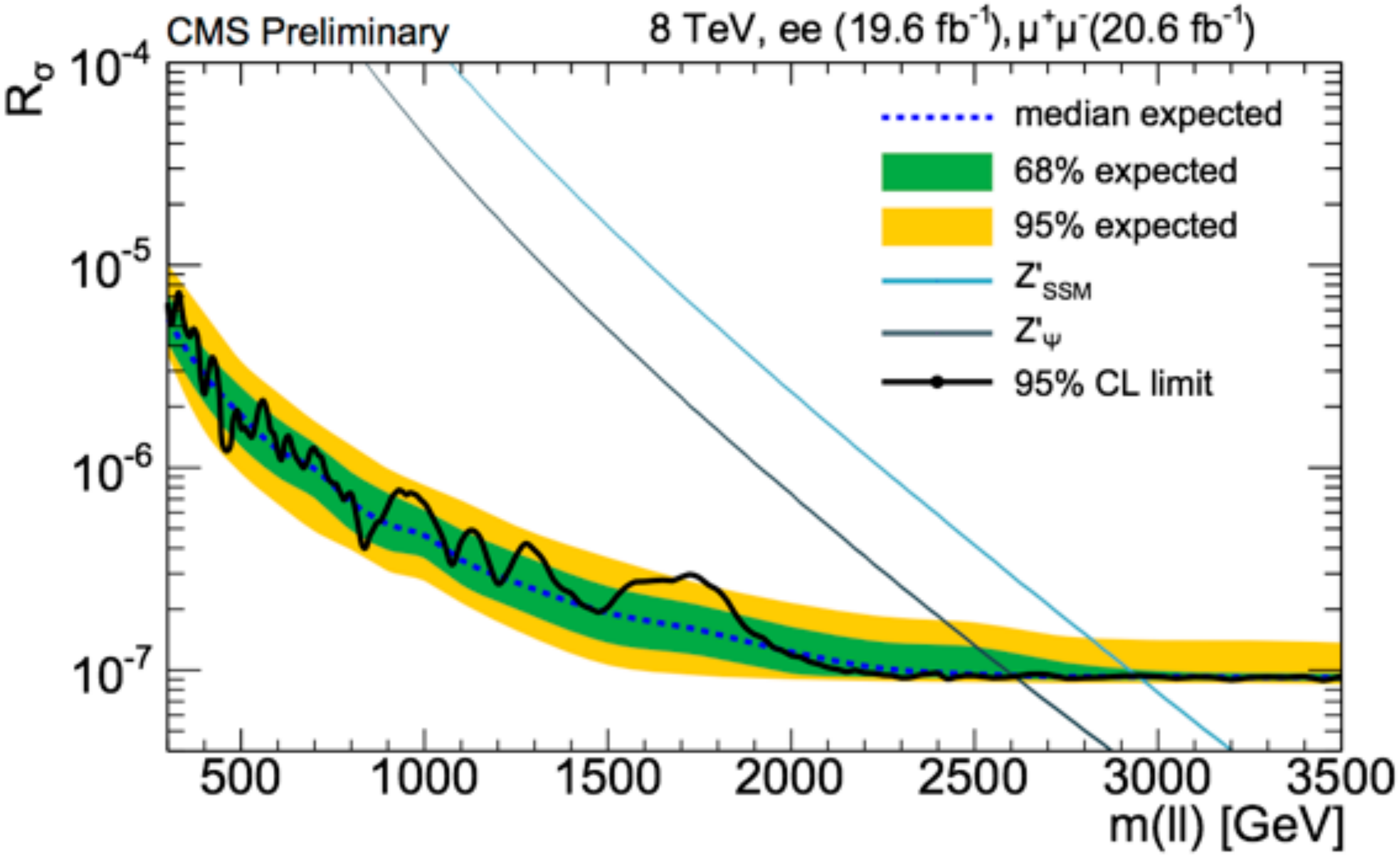
Dijet (qq)

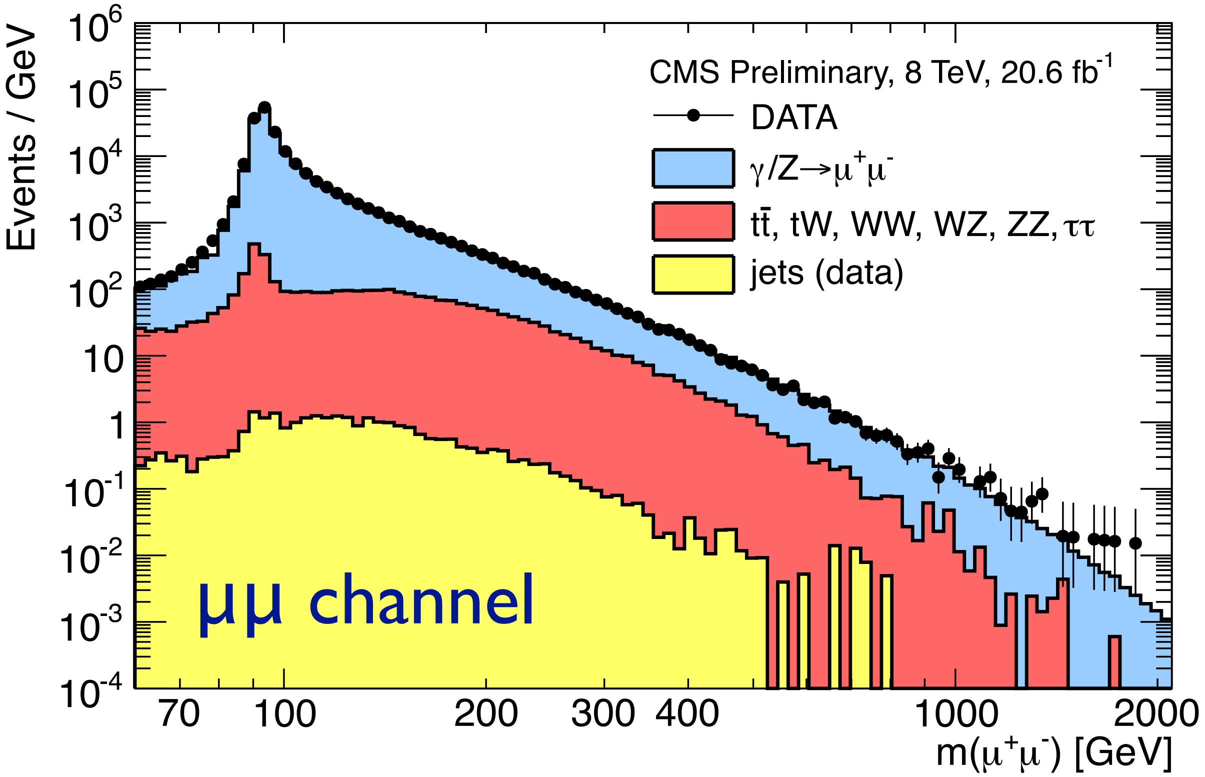
$Z' \to ll$

ATLAS-CONF-2013-017
CMS PAS EXO-12-061

ATLAS Z'→ll selection : 2 isolated leptons $p_T^{e(\mu)} > 35(45)$ GeV







- Drell-Yan BG estimated by POWHEG (NLO)
- Total simulated background scaled to data at Z-peak ($60 < M_{ll} < 120$ GeV)
- Limits set on $R_\sigma = \dfrac{\sigma(pp \to Z' + X \to \ell\ell + X)}{\sigma(pp \to Z + X \to \ell\ell + X)}$

Z'_{SSM}(→ll)の質量下限：2.96 TeV $^{(CMS)}$

W'/Z' → qq

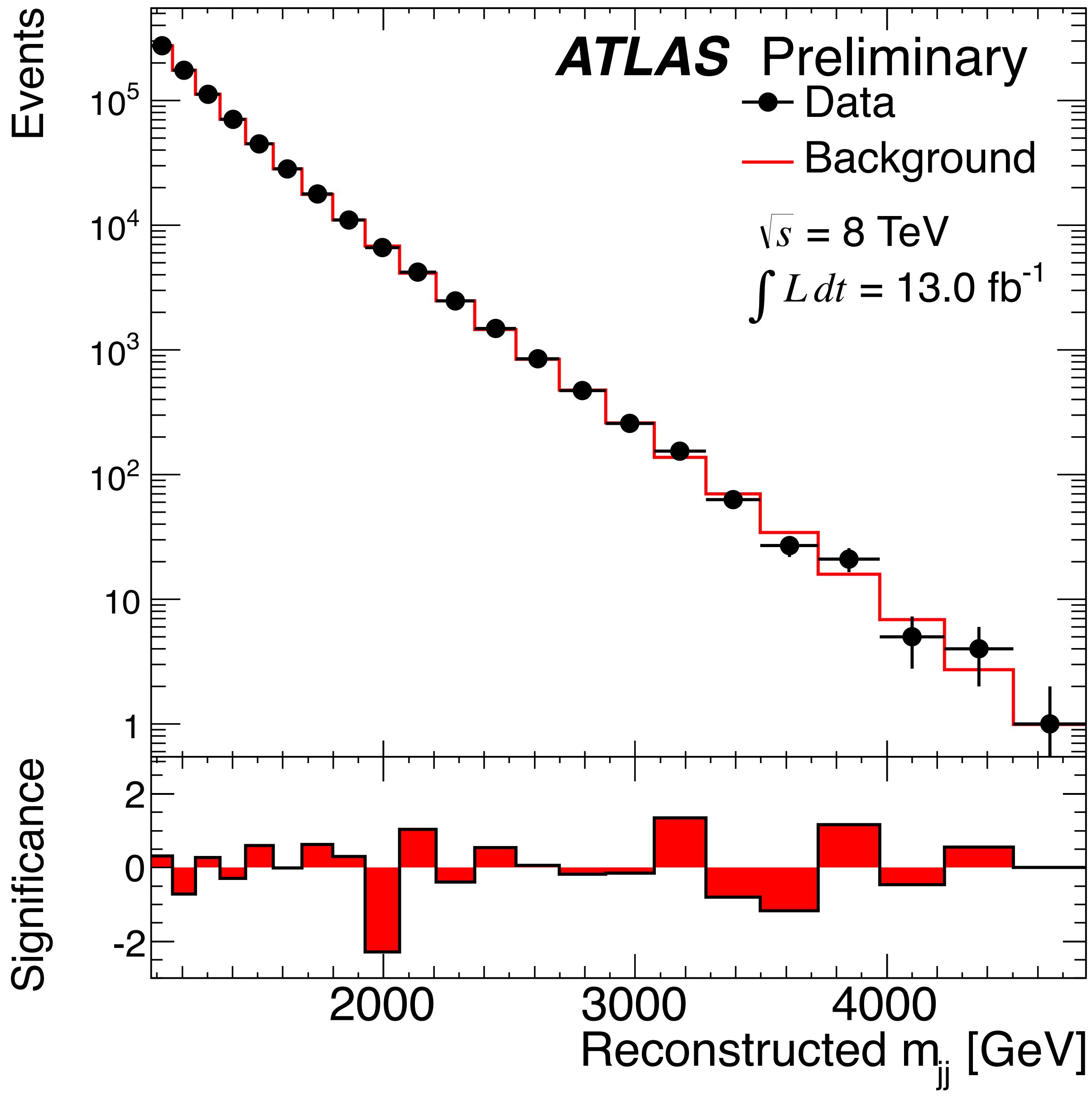
ATLAS-CONF-2012-148
CMS PAS EXO-12-059

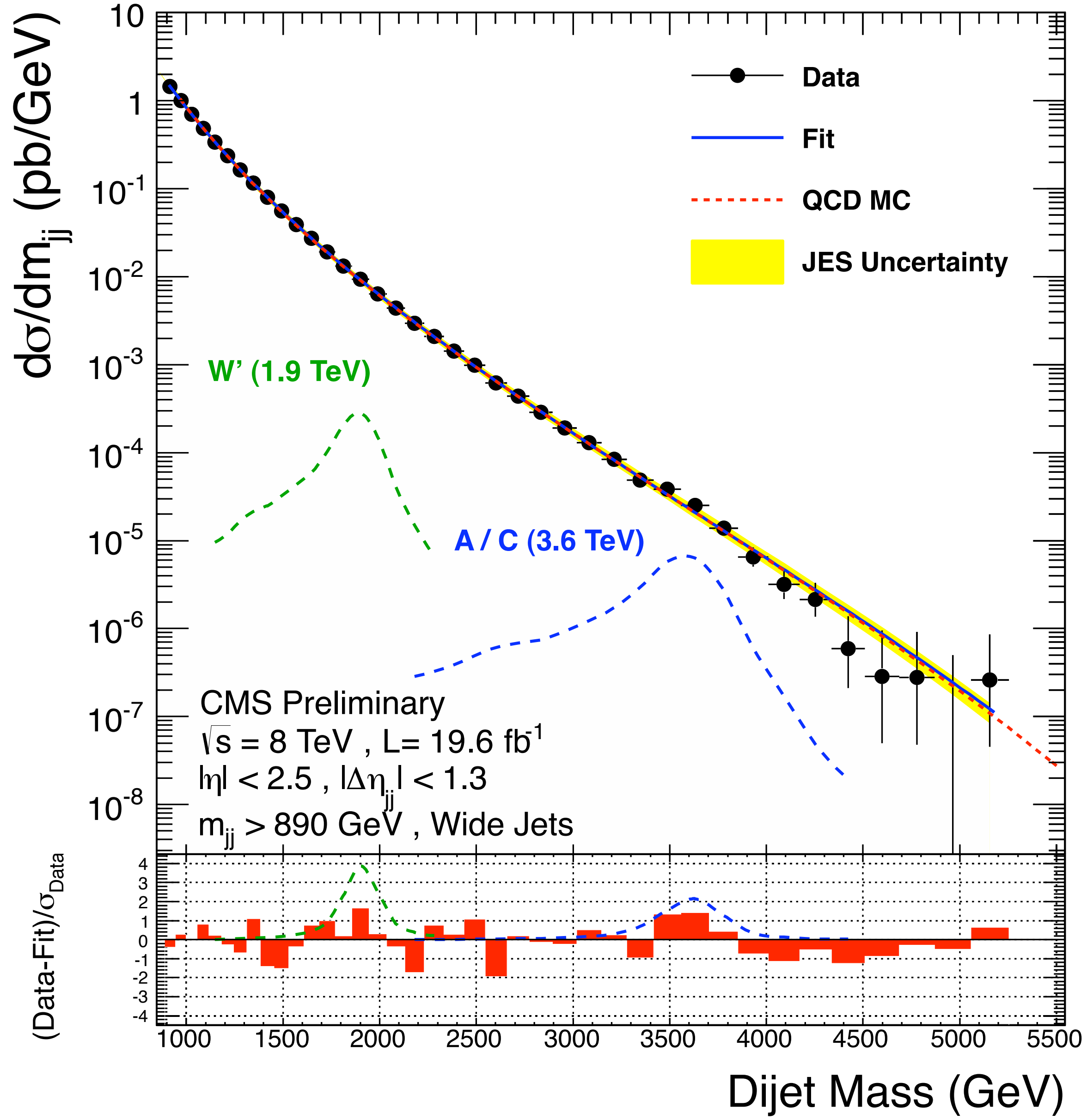
模型に依らないDijet mass bumpの探索

- Quark substructure
- Colored particles
  - Excited quark, W'/Z', color-octet scalers

Smooth background fit to data

$$\frac{dN}{dx} = p_1 \frac{(1-x)^{p2}}{x^{\,p3+p4\cdot \ln x}} \qquad x = m_{jj}/\sqrt{s}$$





W'_{SSM}(→qq)の質量下限：2.29 TeV (CMS)

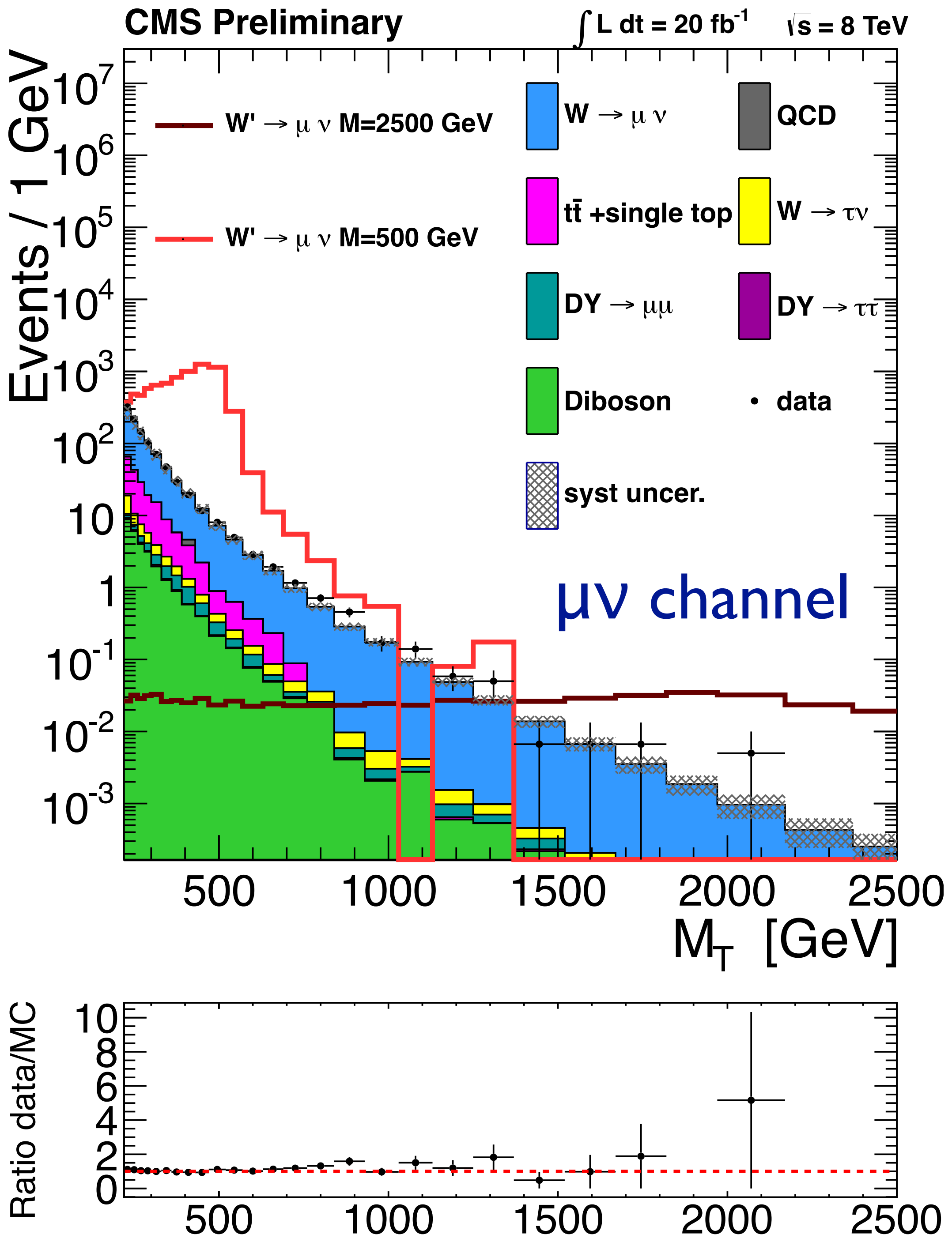
Z'_{SSM}(→qq)の質量下限：1.68 TeV

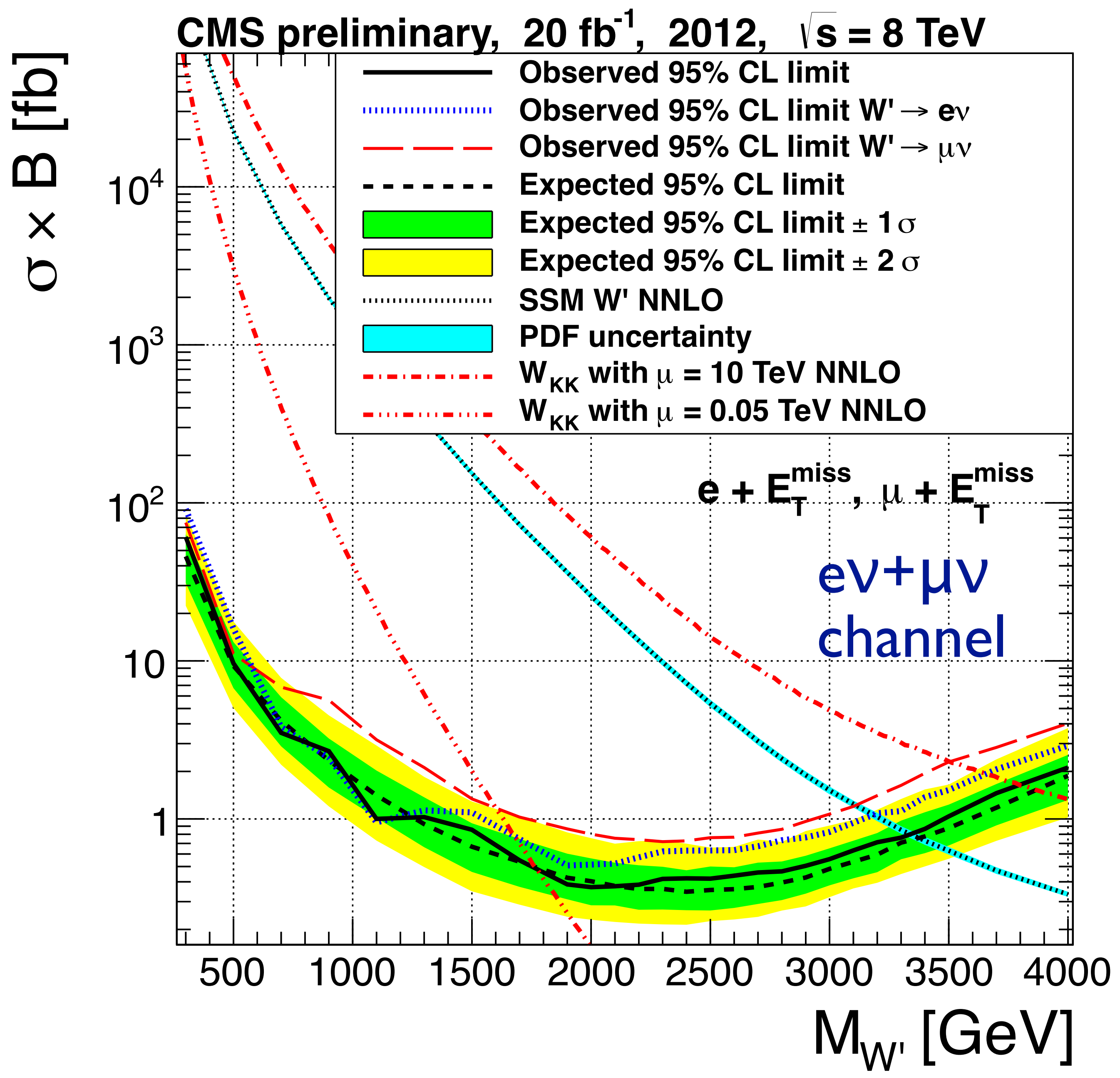
W' → $l\nu$

EPJC 72, 2241 (2012)
CMS PAS EXO-12-060

CMS W'→lν selection

- 1 electron(muon) p_T >100(45) GeV
- $0.4<p_T^{\text{lepton}}/E_T^{\text{miss}}<1.5$
- $\Delta\Phi(\text{lepton}, E_T^{\text{miss}}) > 0.8\pi$





- SM W→lν BG (PYTHIA+NLO QCD corr) extended to high M_T using fit
- SM W - W'_{left} interference considered

$W'_{\text{SSM}}(\to l\nu)$の質量下限：3.35 TeV $^{\text{(CMS)}}$

$W_R \to lN$ ($\to l+lW_R^*$)

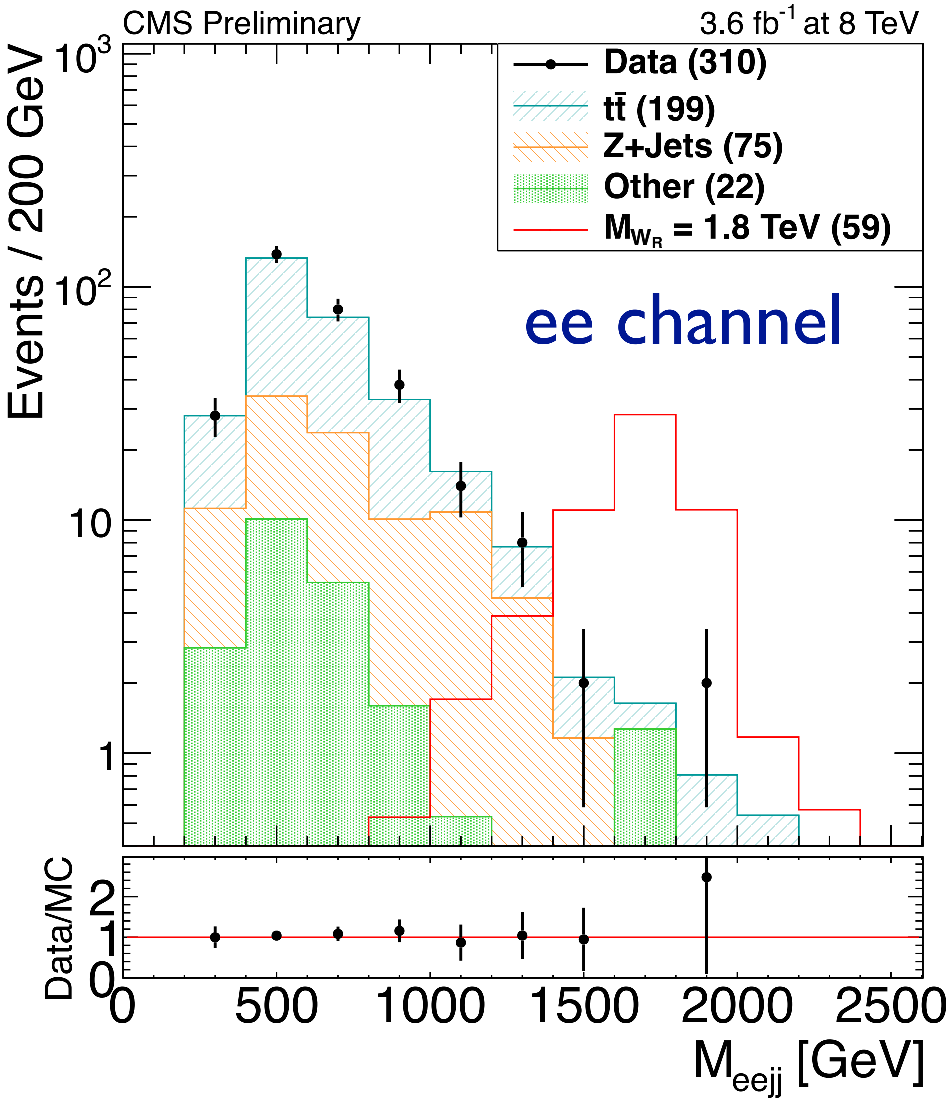
EPJC 72, 2056 (2012)
CMS PAS EXO-12-027

Left-Right symmetric modelでのシナリオ

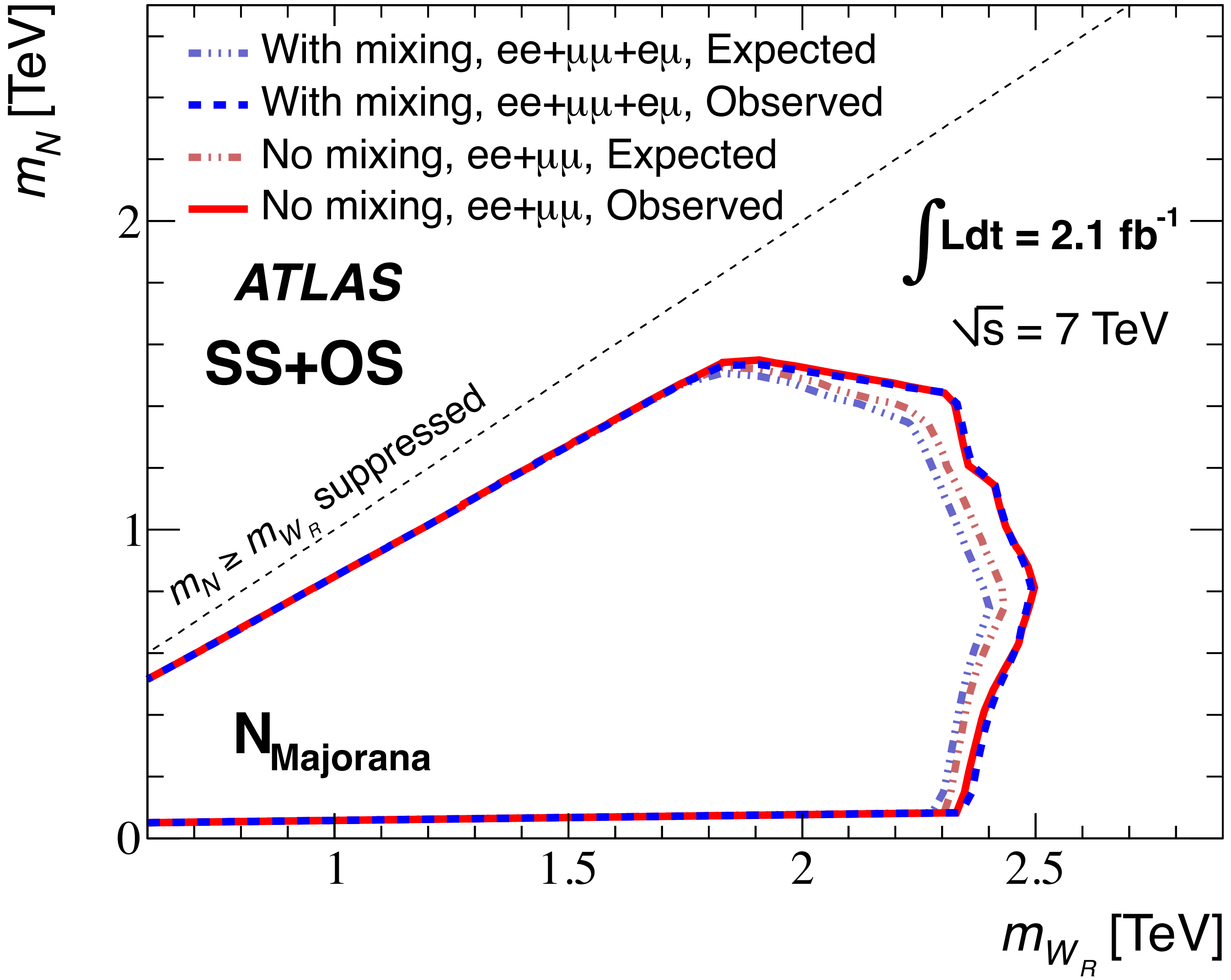
- W_R → Heavy Neutrino崩壊
- フレーバー (non)mixing, N_e=N_μ(=N_τ)

CMS W_R→lN→llW$_R^*$ selection

- 2 isolated SF leptons p_T >60,40 GeV
- 2 jets p_T >40 GeV
- M_{ll} >200 GeV, M_{lljj} >600 GV



Considered in ATLAS analysis :
- Flavor mixing (eμ), OS-only vs OS+SS
- 1-jet selection for m(W_R)≫m(N)



W_R(→llN)の質量下限：2.5-2.8 TeV (CMS)

(m_N = 0.2-1.8 TeV)

W’ → WZ (→ qqqq)

CMS PAS EXO-12-024

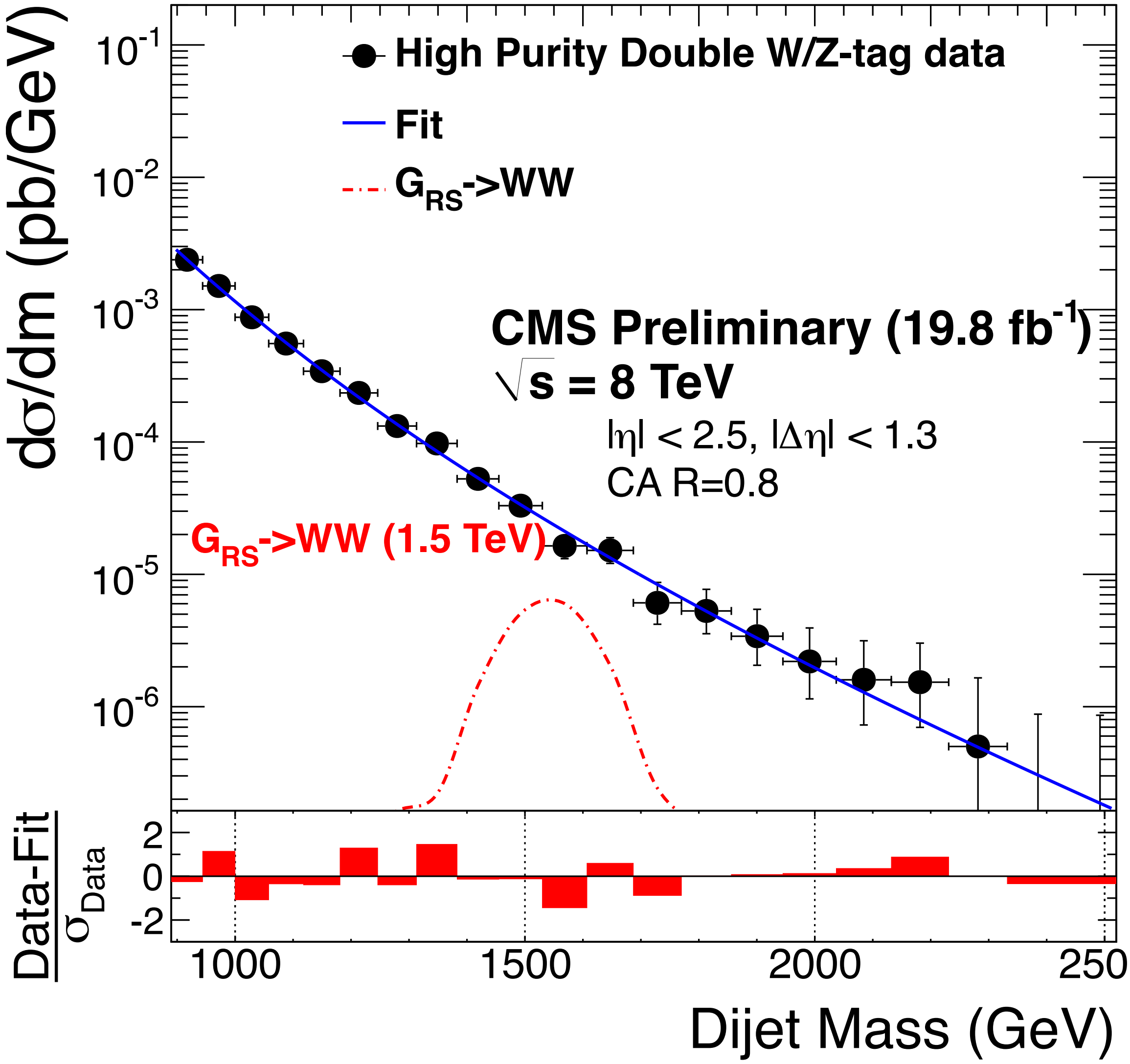
CMS W’→WZ→qqqq selection

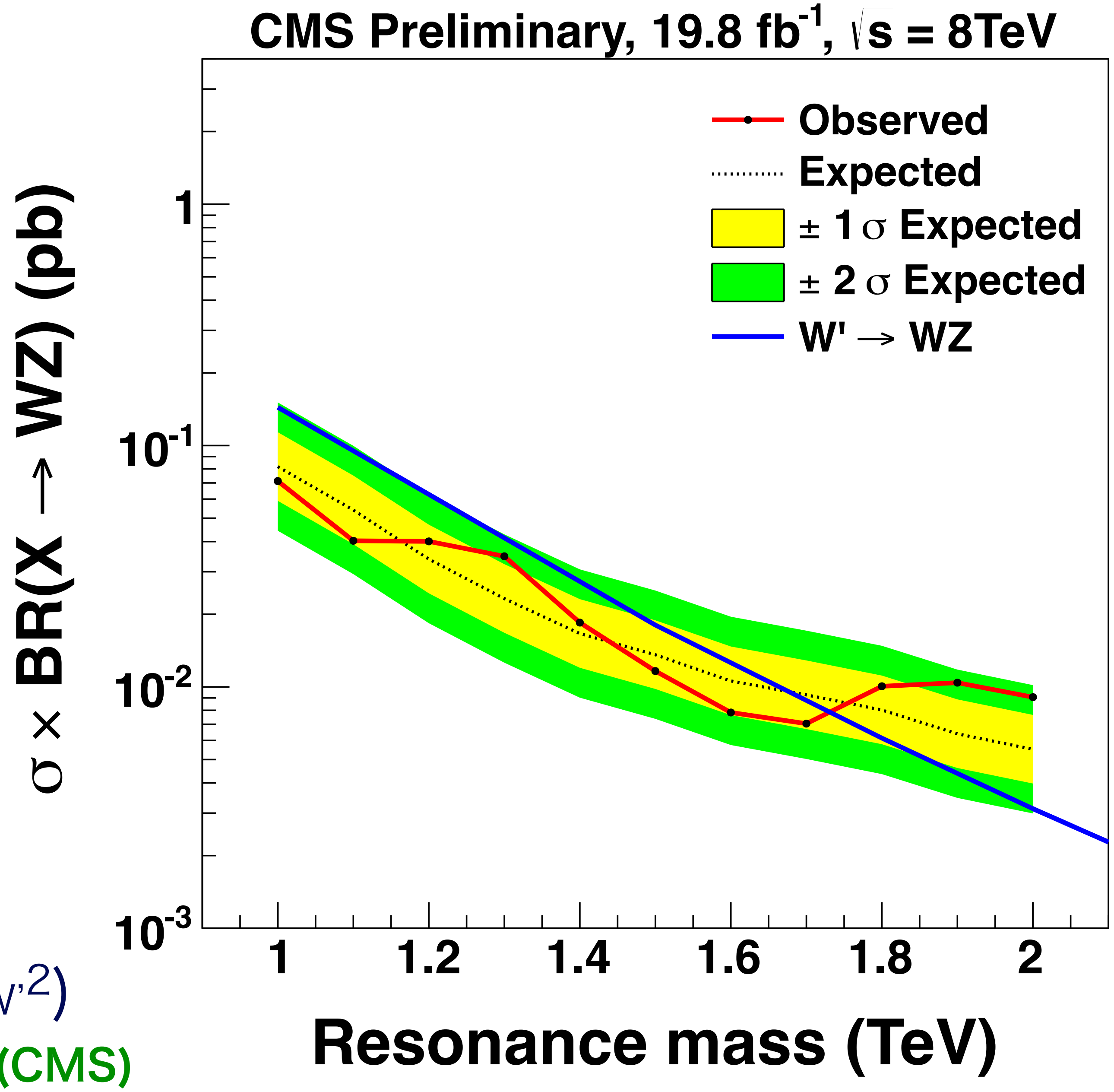
- ≥2 C/A R=0.8 jets p_T >30 GeV
- $|\Delta\eta_{jj}|<1.3$, $M_{jj}>890$ GeV

Exploit jet substructure technique :

- Pruned jet mass : $70<M_{jet}^{Pruned}<100$ GeV
- N-subjettiness : $\tau_{21}<0.5$ (tight), 0.5-0.75 (medium)

⇒ Tight double-tag : ε_{signal}~10-20%, $\varepsilon_{background}$<0.1%!!





SSM + EGM W’結合 (= $g_{SSM} \times m_W^2/m_{W'}^2$)

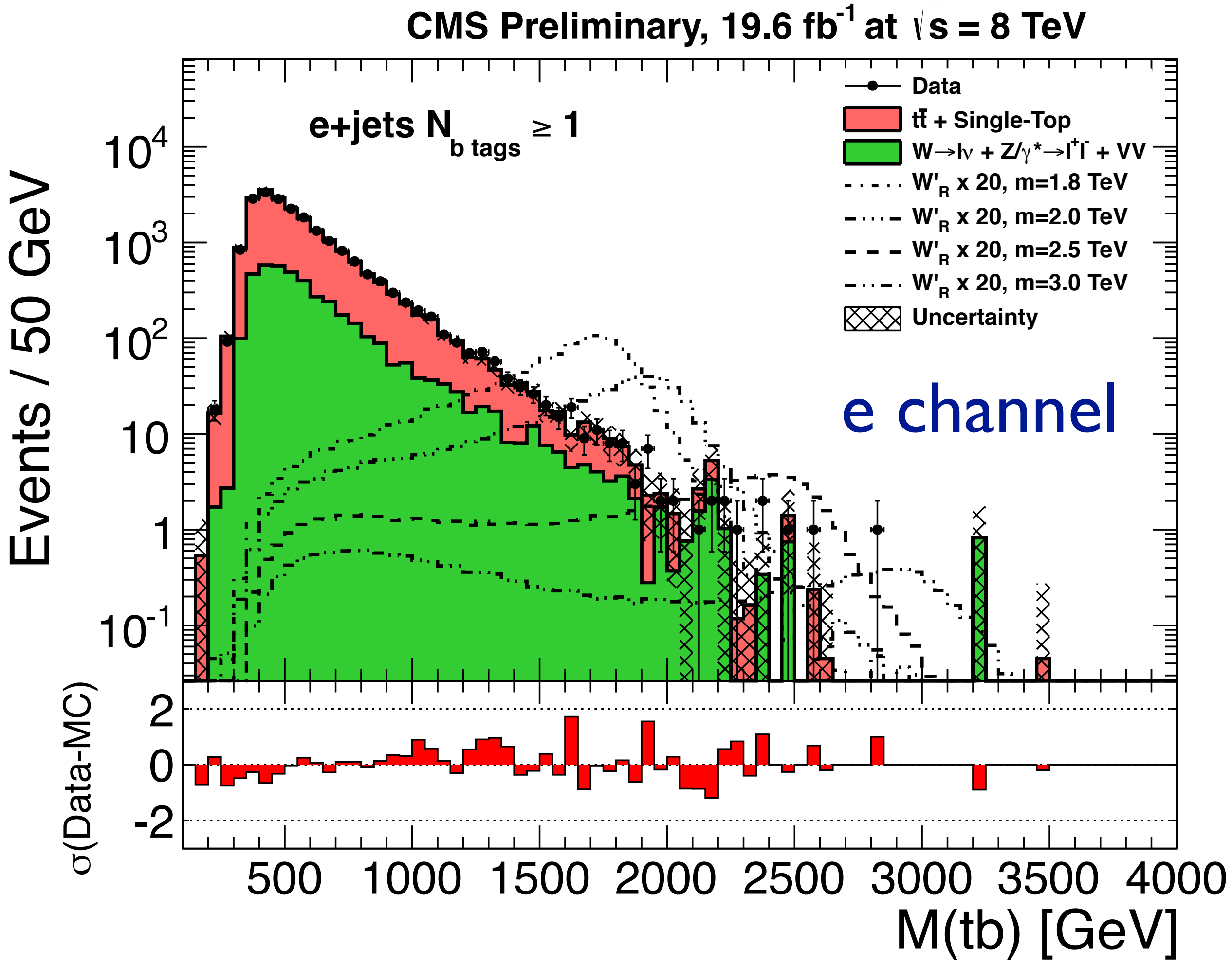
➔ W’(→WZ)の質量下限：1.73 TeV $^{(CMS)}$

W' → tb

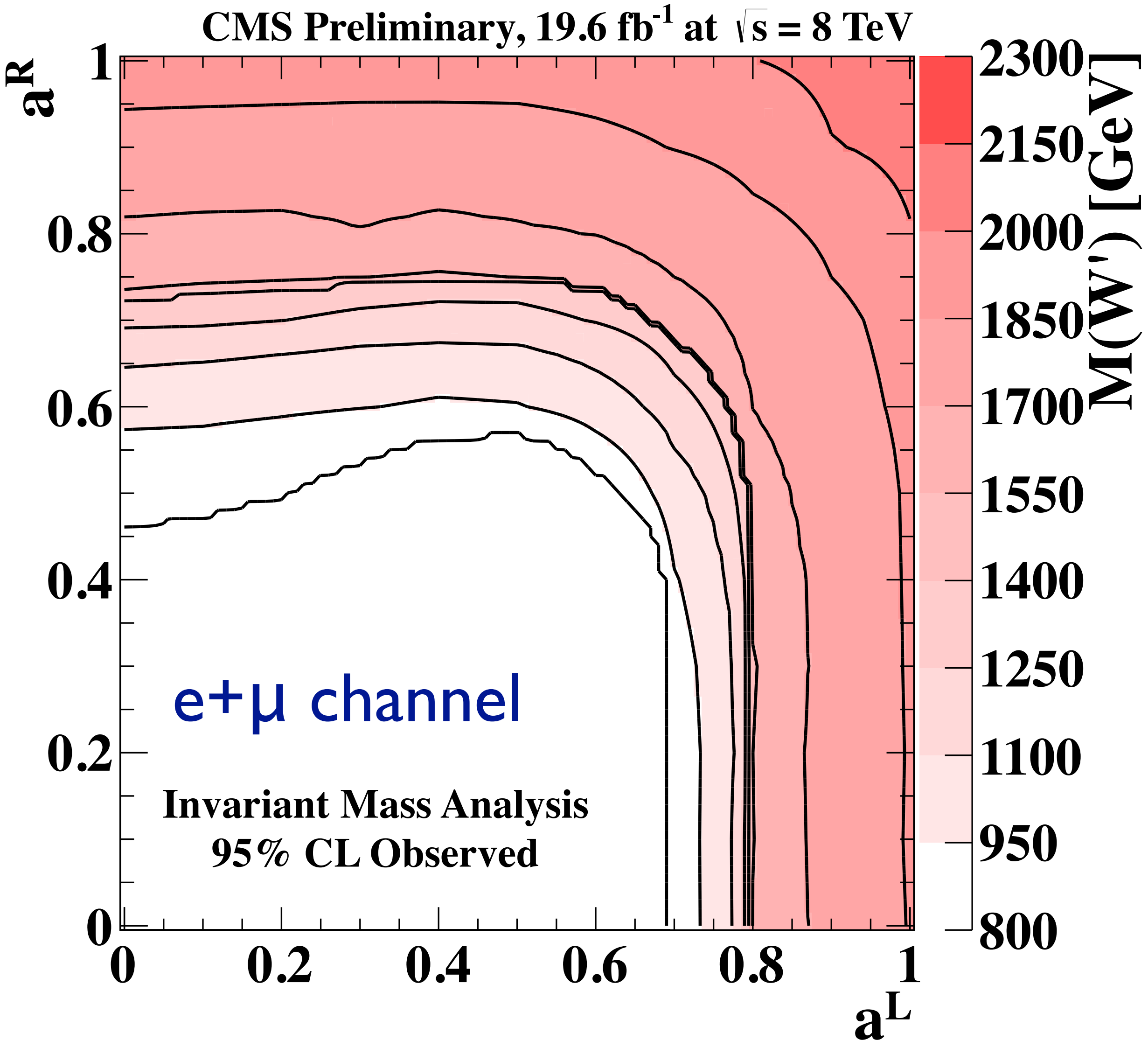
ATLAS-CONF-2013-050
CMS PAS B2G-12-010

CMS W'→tb→lνbb selection

- 1 lepton p_T >50 GeV
- ≥2 jets p_T >120,40 GeV (≥1 b-tag)
- E_T^{miss} >20 GeV



- Neutrino p_Z from W-mass constraint
- Reconstruct top candidate from W and jet (close to m_{top})
- Further criteria to improve S/B
  p_T^{top}>85GeV, p_T^{jj}>140GeV, 130<m^{top}<210 GeV



- LH-only, RH-only, LR-mixed W' samples
- σ · BR limits translated to M(W') limits in a^R vs a^L plane

$$\mathcal{L} \sim g_w \bar{f}_i \gamma_\mu [a^R_{ij}(1+\gamma^5)+ a^L_{ij}(1-\gamma^5)] W'^{\mu} f_j + \cdots$$

W'(→tb)の質量下限：2.0 TeV $^{\text{(CMS)}}$

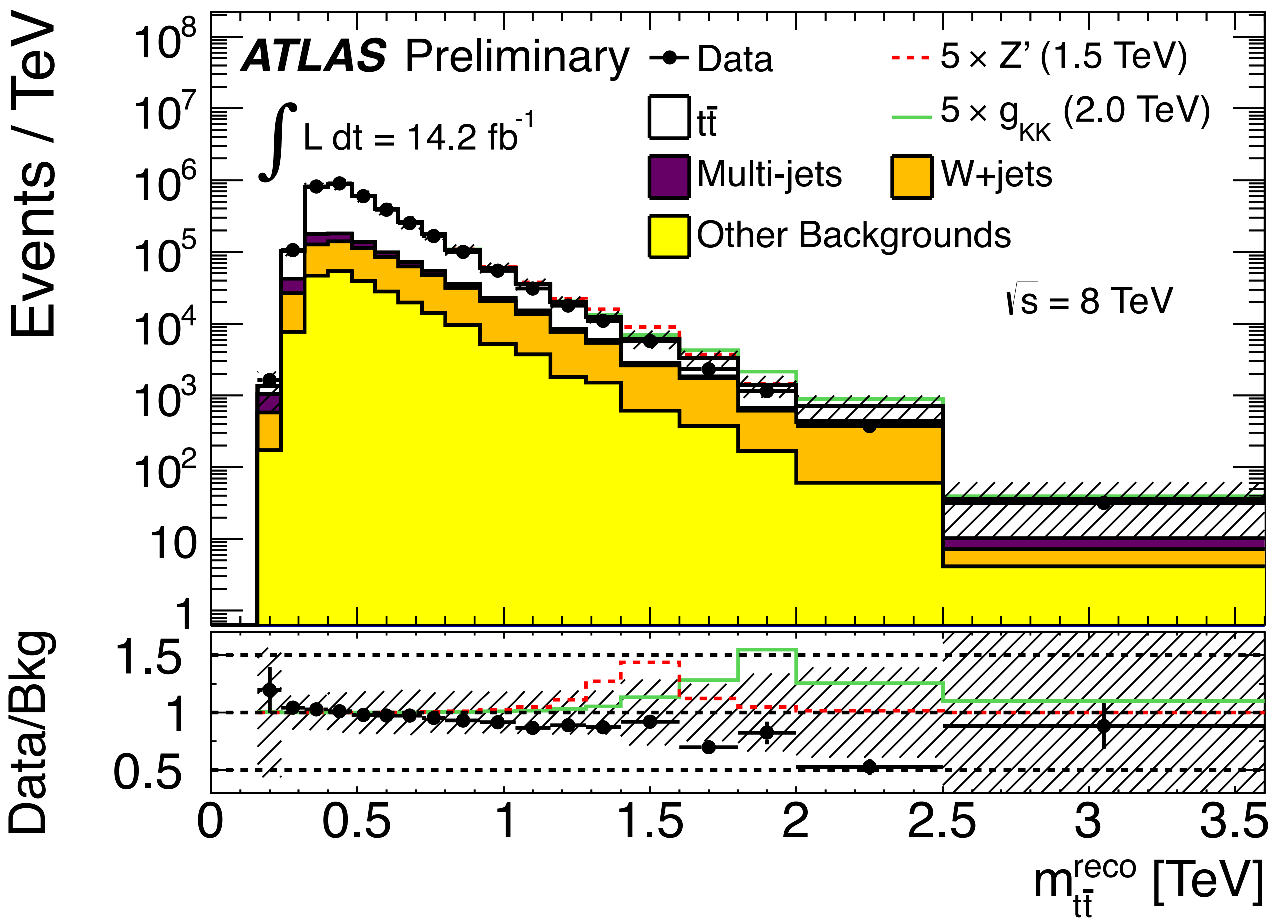
for both RH and LH couplings

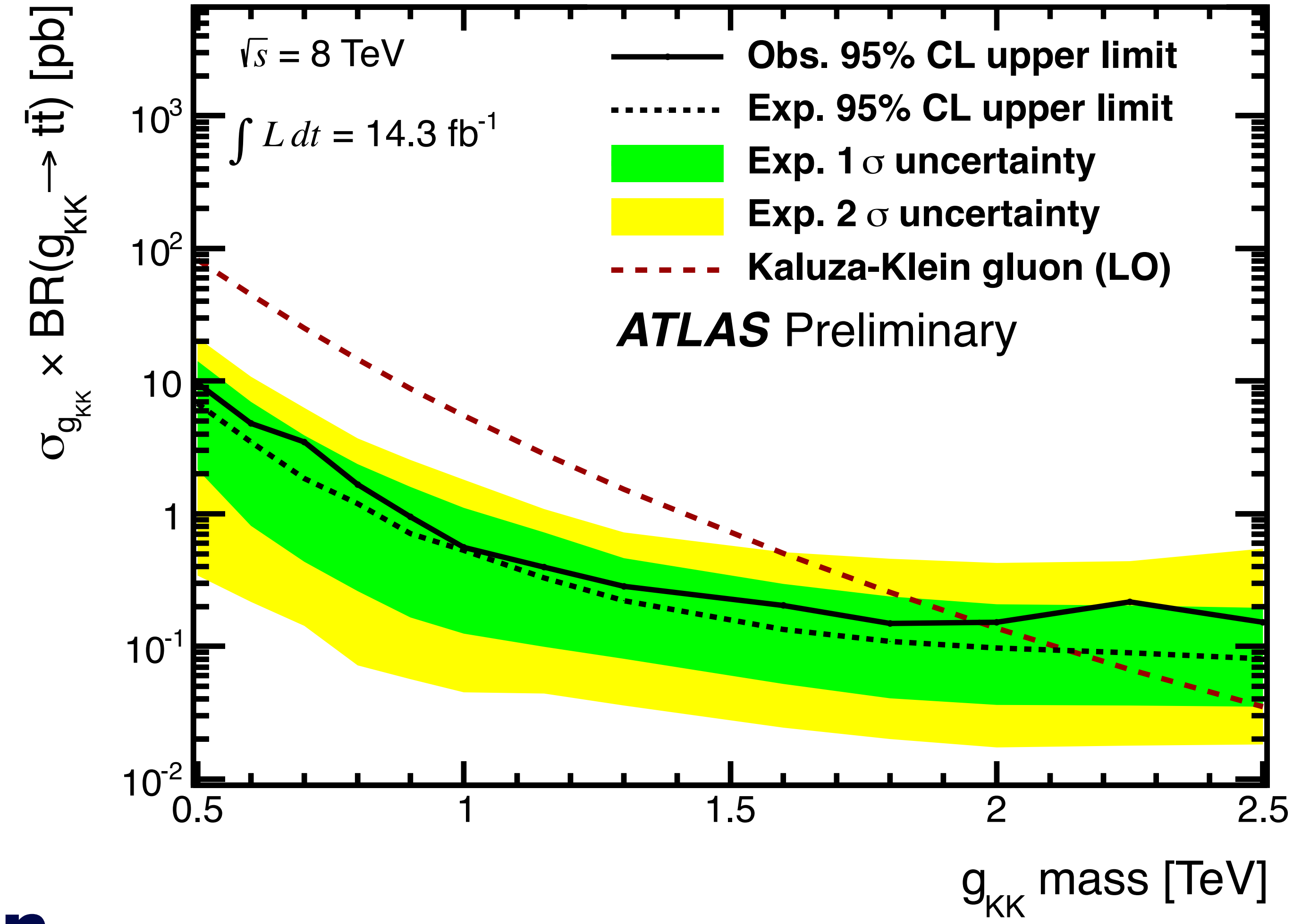
$g^{KK} \rightarrow tt$

ATLAS-CONF-2013-052
CMS PAS B2G-12-006

tt resonance : prominent signature in bulk Randall-Sundrum scenario

- 8 TeV $t\bar{t}$ resonance searches start probing KK mass scale ≥ 2.0-2.5 TeV





ATLAS $g^{KK} \rightarrow tt \rightarrow l\nu bqqb$ selection

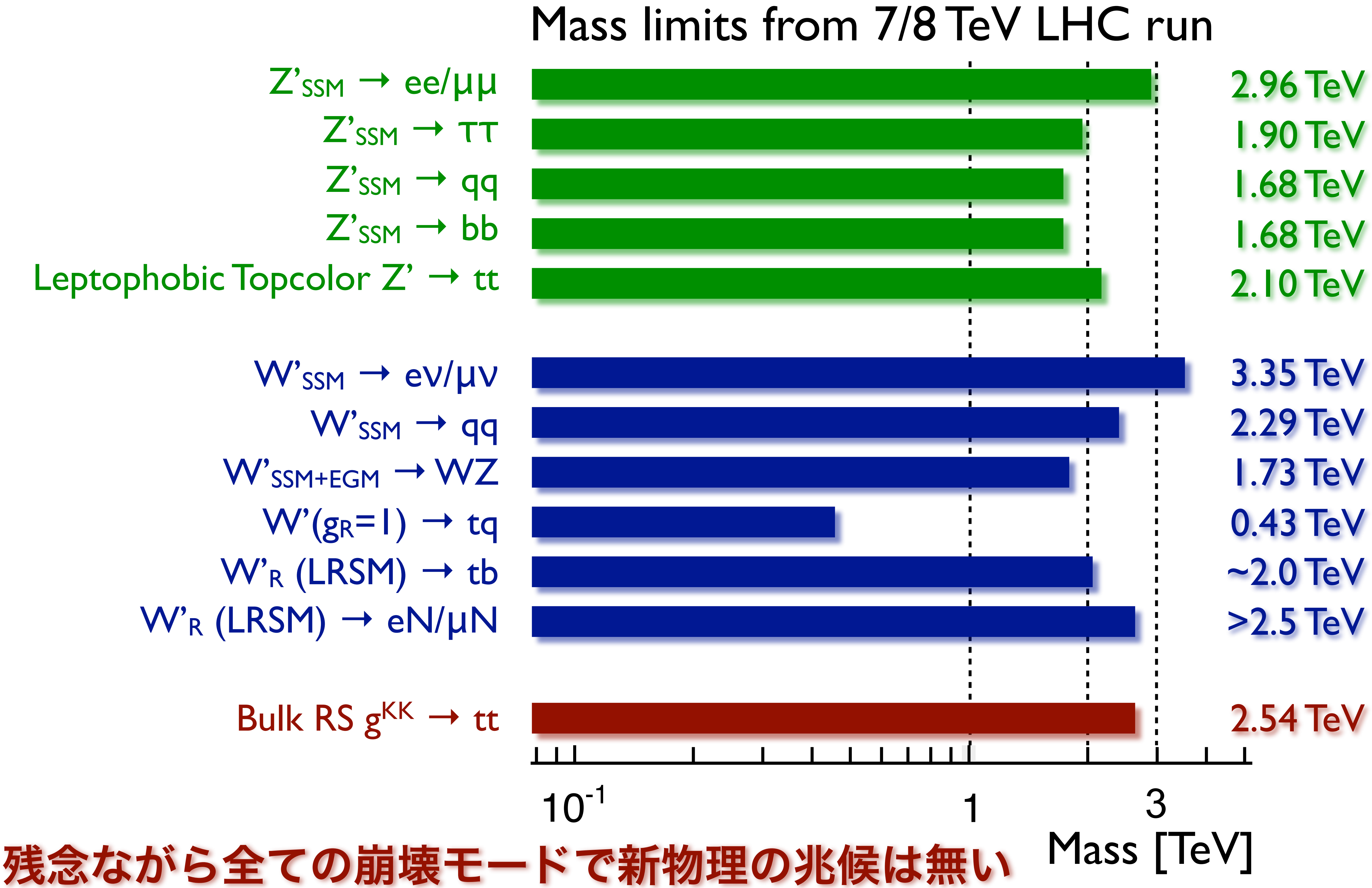
- 1 lepton p_T >25 GeV, E_T^{miss} and M_T^W cuts
- Boosted : R=1.0 "trimmed" jet with
  m_{jet} >100 GeV, $\sqrt{d_{12}}$ >40 GeV
- Resolved : ≥4 R=0.4 jets
  (≥3 jets if m_{jet} >60 GeV)
- ≥1 b-tagged R=0.4 jets

g^{KK}(→tt)の質量下限 : 2.54 TeV $^{(CMS)}$

➡ Entering into regime predicted from precision EW measurements

Topcolor Z'(→tt)の質量下限 : 2.10 TeV

Run 1 Limits on W’/Z’/g^{KK}



残念ながら全ての崩壊モードで新物理の兆候は無い

〜2 TeVまではほぼ全て棄却

➡ Run 2ではどこまで行ける？

Z'→*ll* / W'→qq at 14 TeV

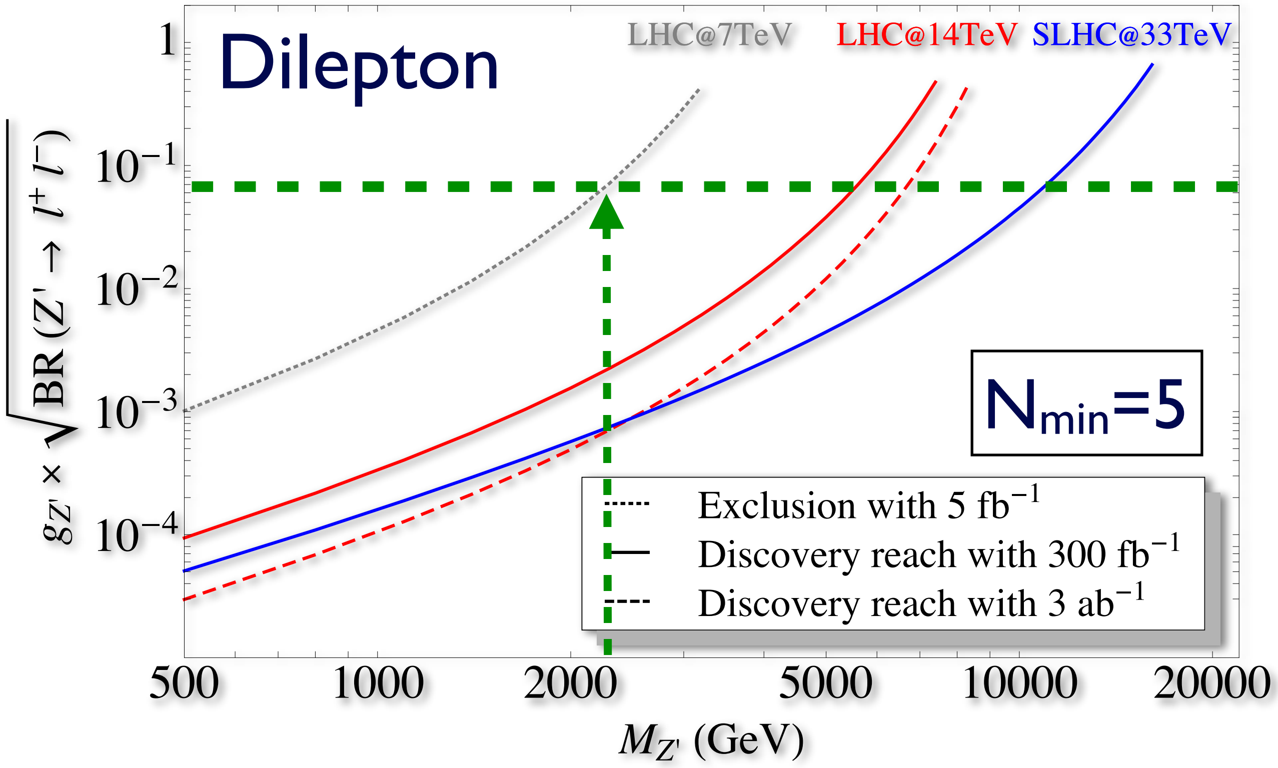
LHC2TSP workshop
arXiv:1307.7135

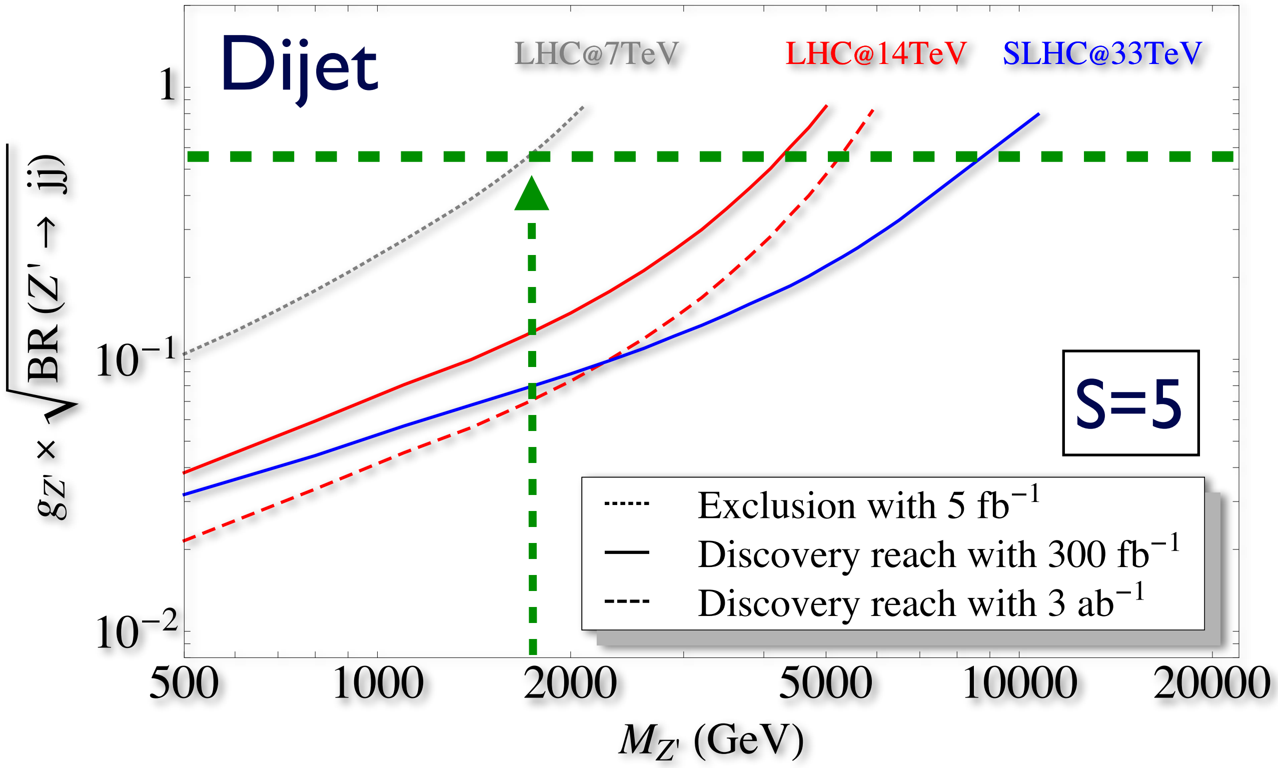
$$\mathcal{L}_{Z'} \sim g_{Z'} Z'_\mu \left(\bar{q}_i \gamma^\mu \frac{1-\gamma_5}{2} q^i \right)$$

Universal left-handed coupling to up and down quarks assumed

$$g_{Z'}\sqrt{\mathrm{BR}(Z' \to l^+ l^-)} = \left(\frac{N_{\min}}{\sigma(q\bar{q} \to Z')|_{g_{Z'}=1}\ A\epsilon L} \right)^{1/2}$$

$$g_{Z'}\sqrt{\mathrm{BR}(Z' \to l^+ l^-)} = \left(\frac{S\sqrt{N_{\mathrm{BG}}}}{\sigma(q\bar{q} \to Z')|_{g_{Z'}=1}\ A\epsilon L} \right)^{1/2}$$





Z'SSM→ll

2.2TeVまで棄却（7TeV, 5fb^{-1}）

➡ ~5.5(7.0)TeVまで発見可能

at 14TeV, 300 (3000) fb^{-1}

Snowmass CMS White Paper :

~5.2(6.3) TeV at 300(3000) fb^{-1}

W'SSM→qq

1.7TeVまで棄却（7TeV, 5fb^{-1}）

➡ ~4.0(5.0)TeVまで発見可能

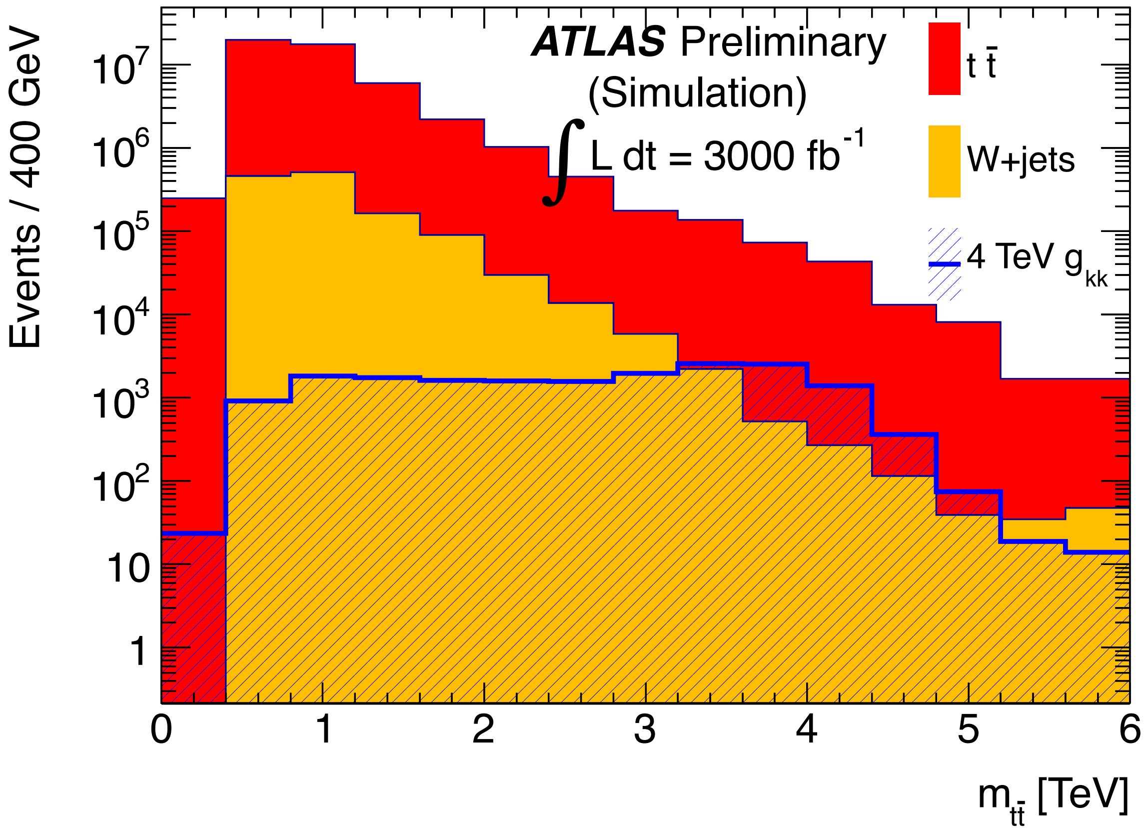
at 14TeV, 300 (3000) fb^{-1}

$g^{KK}\rightarrow tt$ / $Z'\rightarrow tt$ at 14 TeV

ATLAS-PHYS-PUB-2013-003

Lepton+jetsチャンネル

- 1 lepton p_T >25 GeV, E_T^{miss} >50 GeV
- ≥1 R=0.4 jet p_T >25 GeV
- ≥1 R=1.0 jet p_T >250 GeV, m_{jet} >120 GeV



$g^{KK}\rightarrow tt$

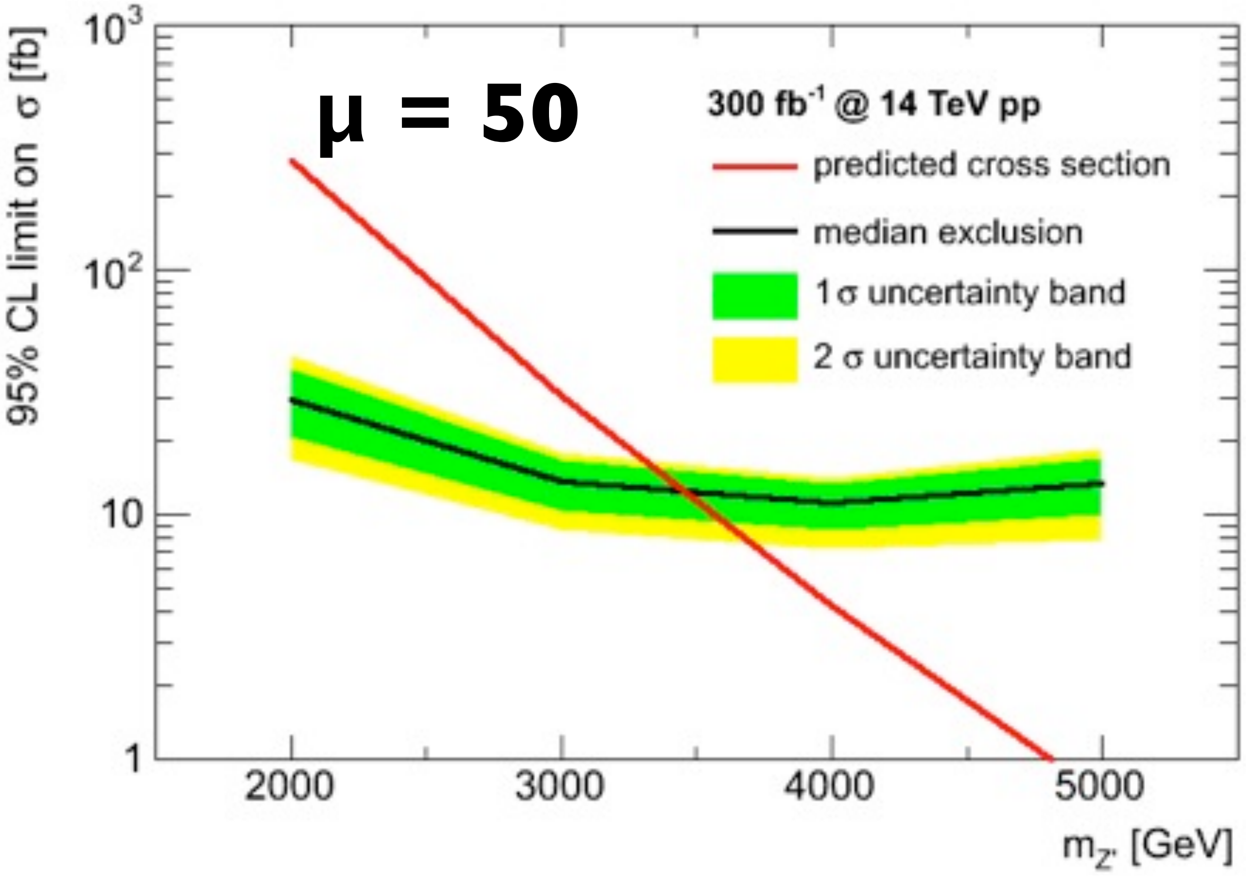
➡ ~4.3(6.7)TeVまで棄却可能

at 14TeV, 300 (3000) fb^{-1}

Soon to be updated for Snowmass...

Full hadronicチャンネル

- 2 C/A R=0.8 jets p_T >750 GeV
- Top-tag : Q_W>70 GeV, $m_{jet}^{Trimmed}$>70 GeV
- b-tag : ε = 50(30)% at 0.75(1.5) TeV
  f_{mistag} = 2.5(5)% at 0.75(1.5) TeV
  f_{mistag} raised by 30(70)% for μ=50(140)



$Z'\rightarrow tt$

➡ ~3.7(4.1)TeVまで棄却可能

at 14TeV, 300 (3000) fb^{-1}

Vector-like Quark

“Top Partner”

- Composite Higgs模型 (Higgs = pNGボソン) では一般的に現れる。
- 軽いヒッグス質量を説明するのに有効（→ SMトップの寄与を相殺）

SMヒッグス質量補正

$$\boxed{\Delta = \frac{\delta_{\rm UV} m_H^2}{m_H^2} \gtrsim \left(\frac{\Lambda_{\rm UV}}{400\,{\rm GeV}}\right)^2 \sim 10^{27}}$$

if NP scale $\Lambda_{\rm UV}$ ~ GUT scale (10^{16} GeV)

“Fine tuning” (階層性問題) を避けるには **$\Lambda_{\rm UV}$ ~ TeV**が必要

→ “Top” partners with m ~ $\Lambda_{\rm UV}$ ~ TeV to cancel SM top contributions

➡ Fermionic top partner with vector coupling   Cf.) Scaler top in SUSY

(left- and right-handed components have same EW quantum numbers)

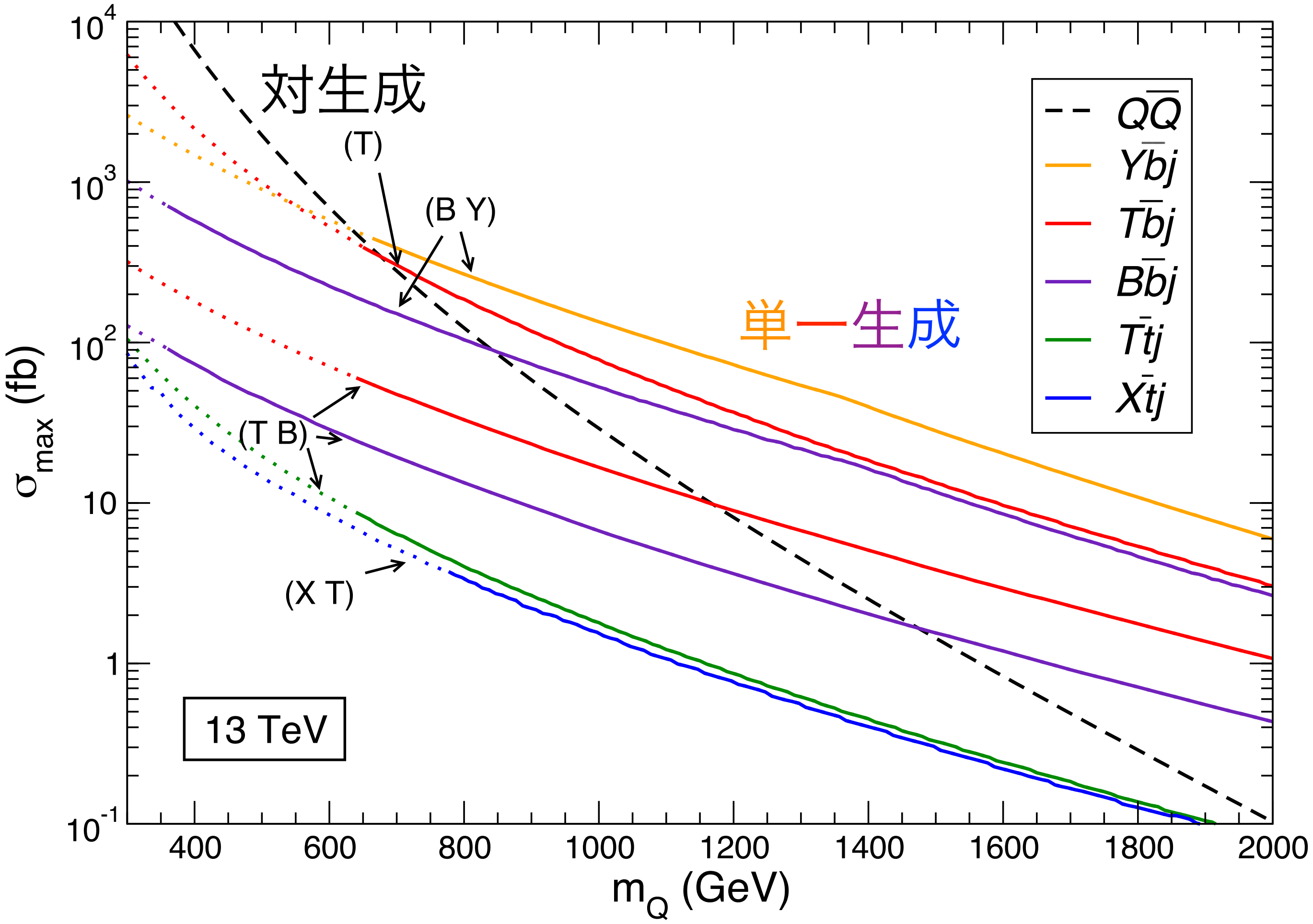
VLQ Type	Electric Charge (Q)
T Singlet	+2/3
B Singlet	-1/3
(T,B) Doublet	(+2/3,-1/3)
(X,T) Doublet	(+5/3,+2/3)
(B,Y) Doublet	(-1/3,-4/3)

Vector-like quark

- SMクォーク（特に第三世代）と混合
- 主にT→Wb/Zt/Ht, B→Wt/Zb/Hbに崩壊
- 対生成 (QCD) ➡ model-independent
- 単一生成 (EW) ➡ 高い質量領域で重要

Search Strategy

崩壊比の違いは終状態の違いでカバーする



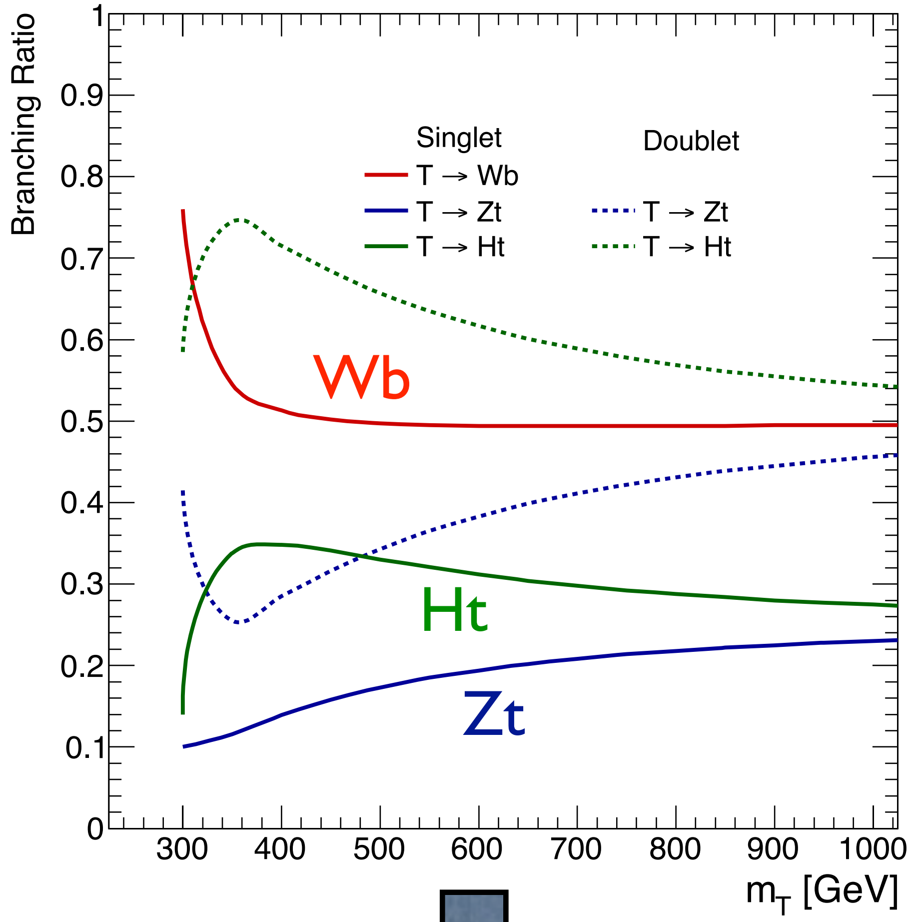
初期探索は対生成信号で行う

- 模型に非依存（⬅ QCD結合）
- 複数のt/bクォーク崩壊 ➡ 信号が特徴的

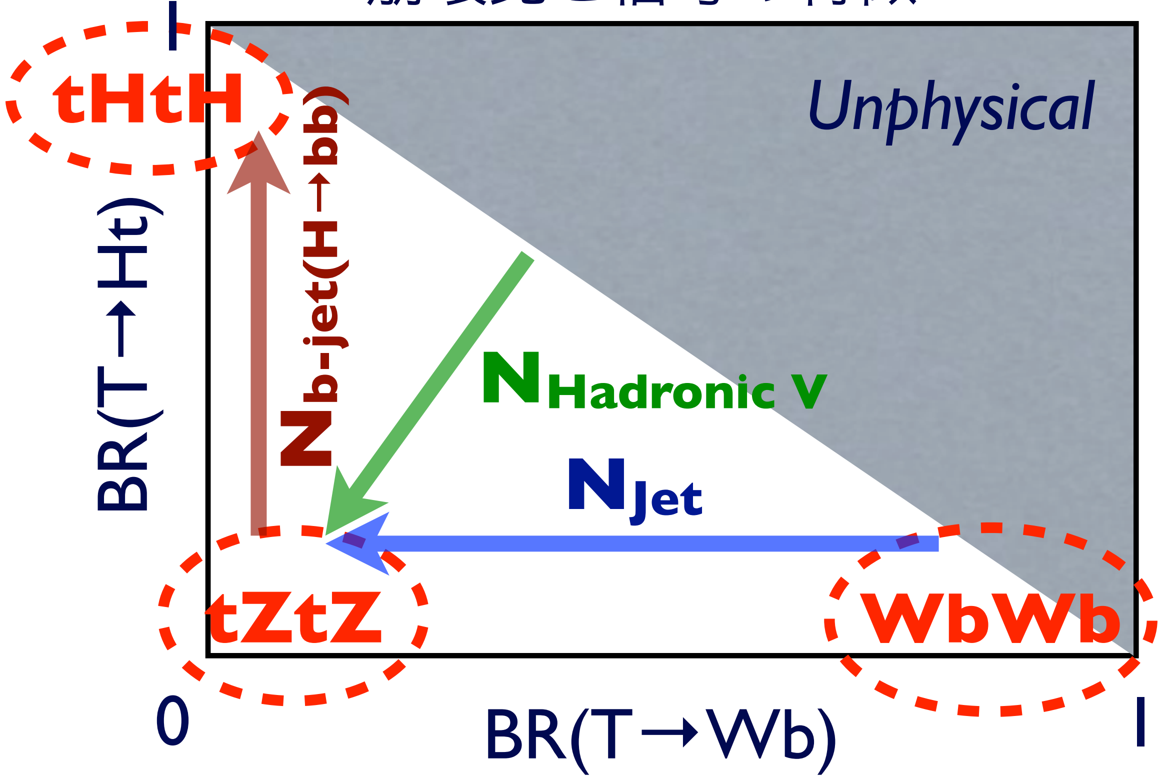
高い質量領域への拡張は単一生成信号で行う

- 模型依存（⬅ EW結合）

Top partner(電荷+2/3)の崩壊比



崩壊比と信号の特徴



t' → Wb

ATLAS-CONF-2013-060

ATLAS t'→Wb+X selection

- 1 lepton p_T >25 GeV
- ≥4 jets p_T >25 GeV (≥1 b-tag)
- E_T^{miss} >20 GeV, $E_T^{miss}+M_T^W$ >60 GeV
- High-p_T hadronic-W jet (merged or resolved)

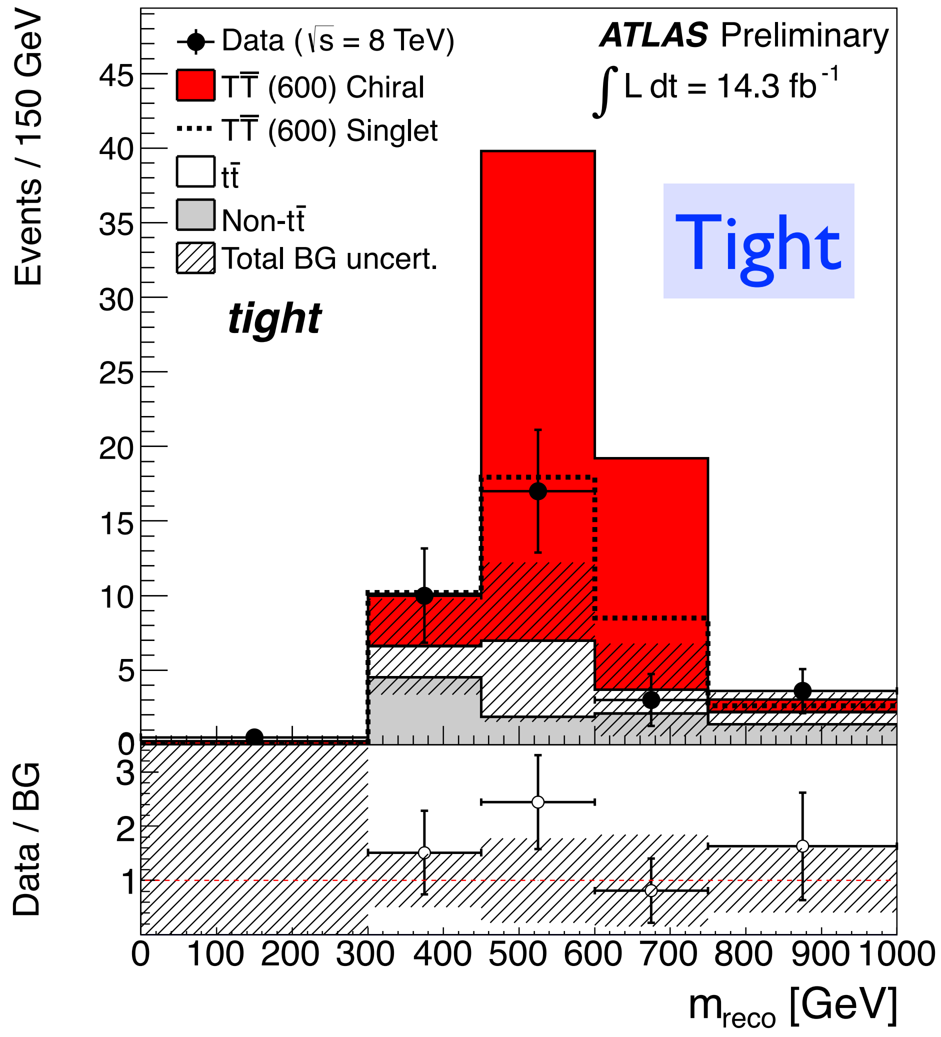
Require topology of boosted W-bosons

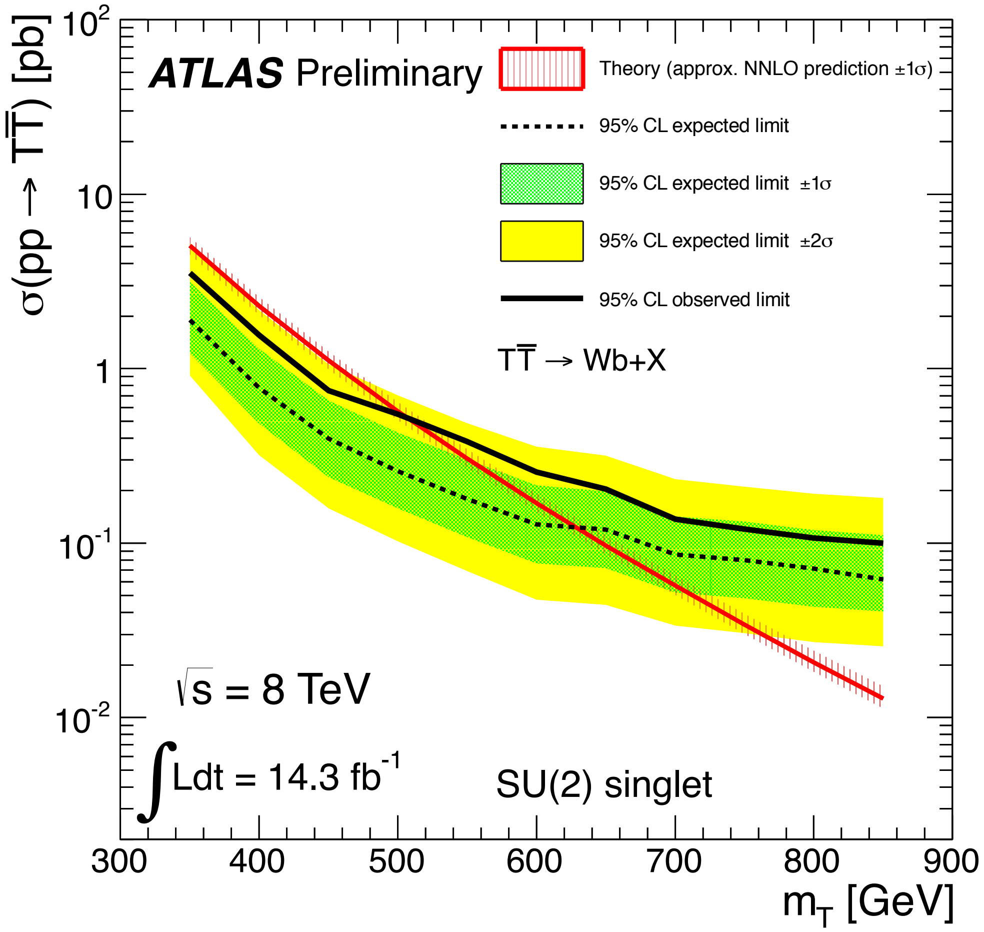
- $H_T = \sum p_T^{lepton,jets} + E_T^{miss}$ >800 GeV
- Two b-jet candidates p_T >160, 80 GeV
- ΔR(lepton, ν) < 1.2 ➔ Loose selection

- min($\Delta R(W^{had}$, b-jet)) > 1.4
- min(ΔR(lepton, b-jet)) > 1.4

➔ Tight selection

SU(2) singlet t' (400-600 GeV)		
Wb	Zt	Ht
~50%	15-20%	35-30%





b' → Zb, t' → Zt

ATLAS-CONF-2013-056

ATLAS Zb/Zt+X selection

- ≥ 1 OS-SF pair leptons $p_T > 25$ GeV
- $|M_{ll} - M_Z| < 15$ GeV
- ≥ 2 jets $p_T > 25$ GeV (≥ 2 b-tags)
- $p_T^Z > 150$ GeV, $H_T = \sum p_T^{jets} > 600$ GeV

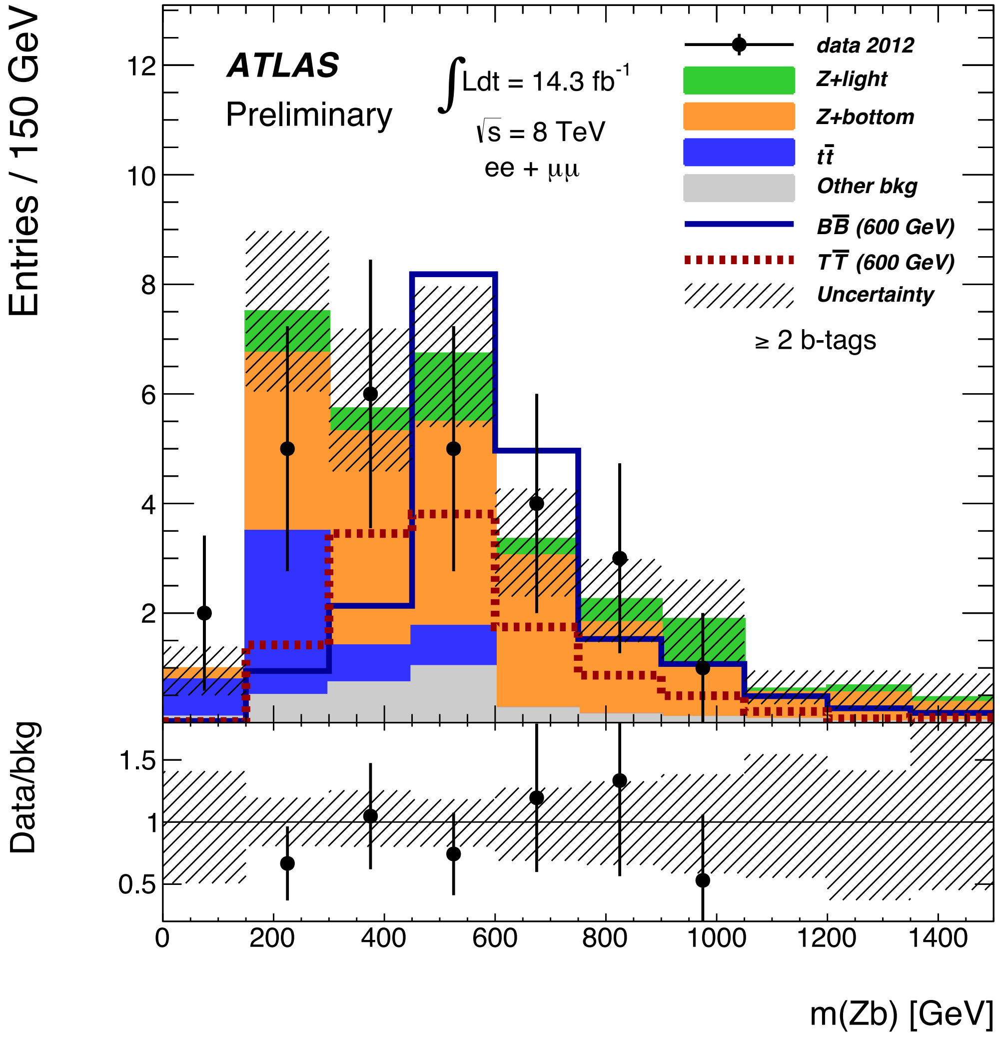
Use $N_{b\text{-tag}} = 0$ or 1 as control regions to validate Z+jets background

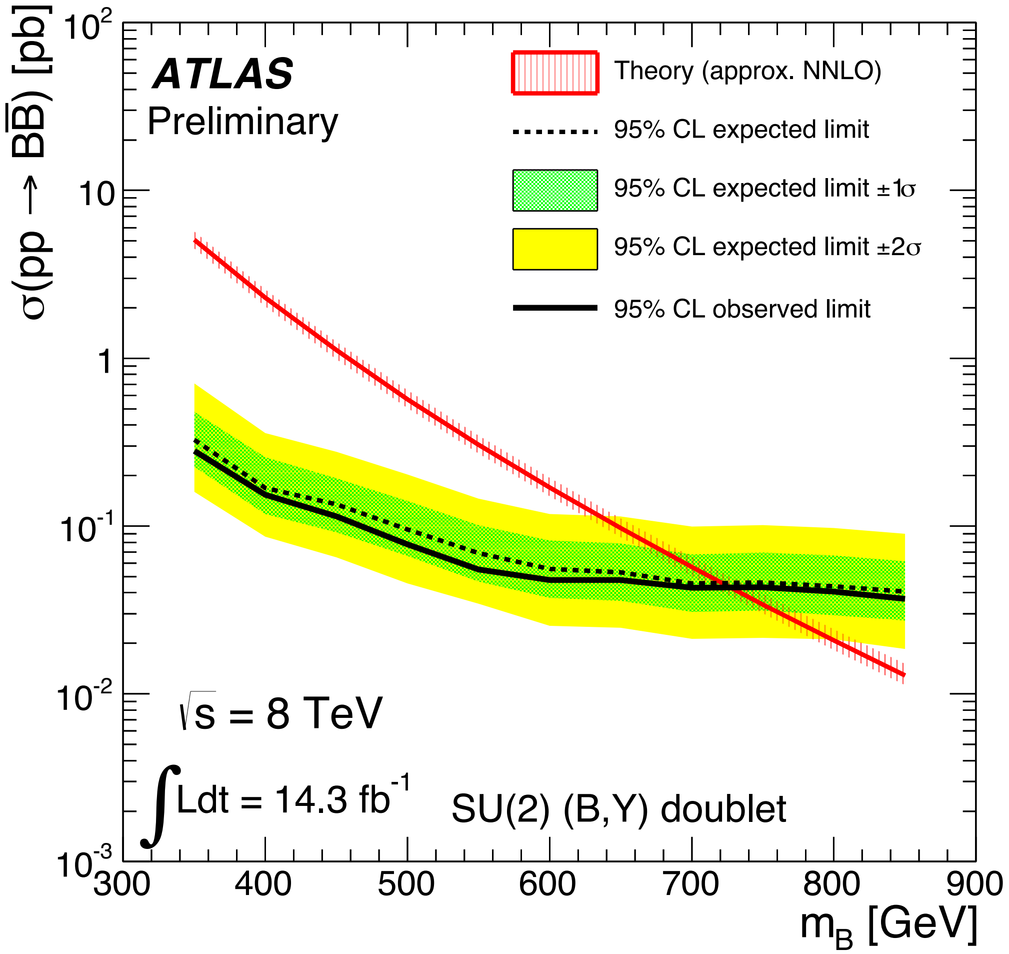
- Normalization at $p_T^Z < 100$ GeV at each $N_{b\text{-tag}}$
- p_T^Z dependence at $N_{b\text{-tag}} = 1$

Invariant mass of Z + leading b-jet used as discriminant

→ ZbとZt(→bW)の両方を選別可能

SU(2) (B,Y) doublet (500-800 GeV)		
Wt	Zb	Hb
0%	55-50%	45-50%



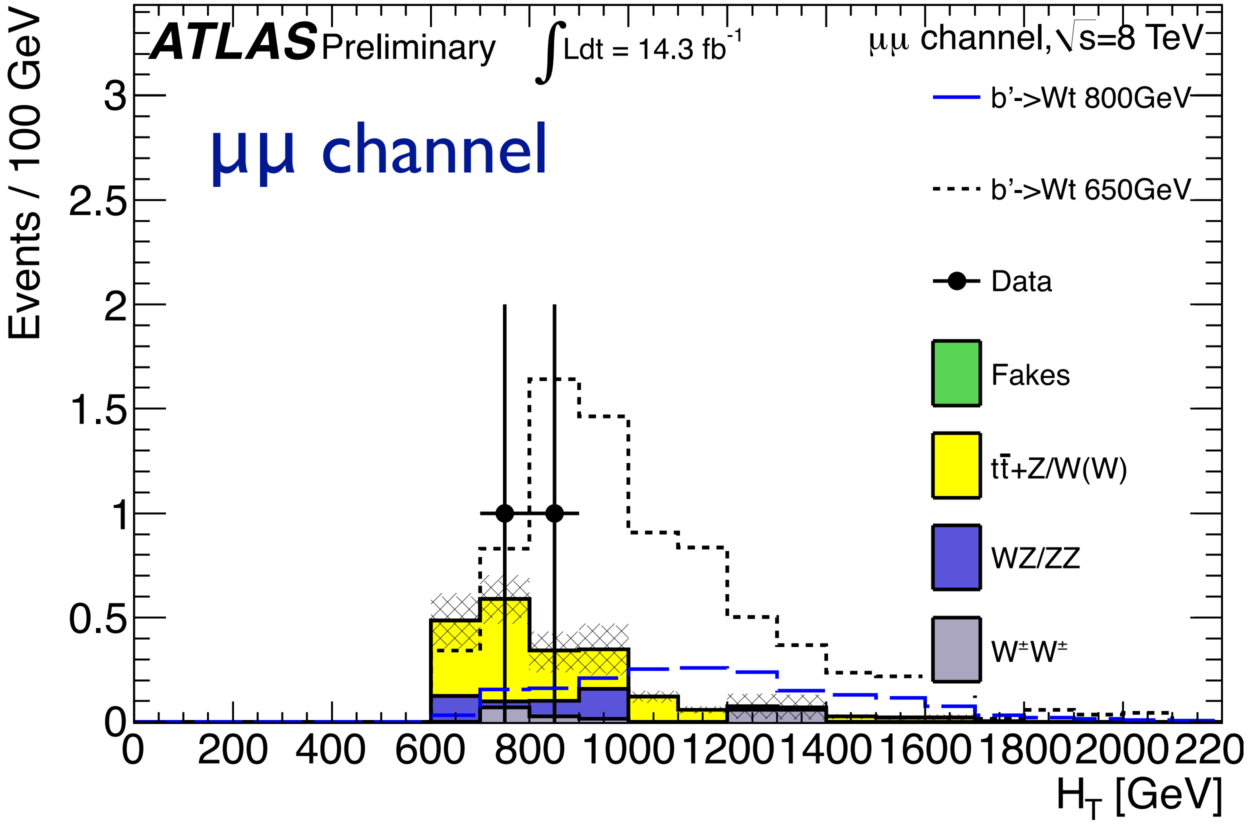


b’/t’ with SS Dilepton

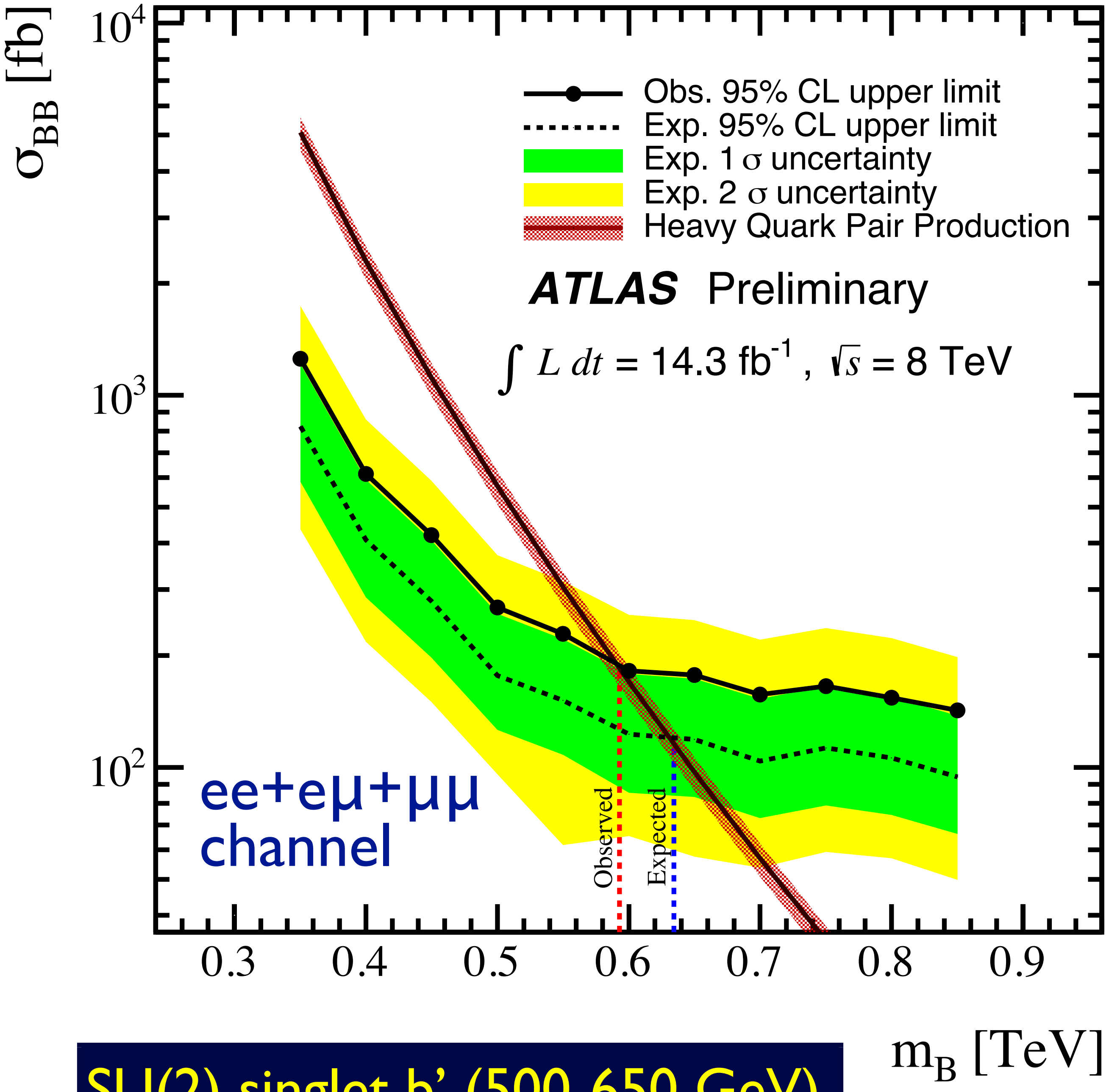
ATLAS-CONF-2013-051

ATLAS b’→Wt, t’→Zt/Ht with SS dilepton selection

- 2 same-sign leptons p_T >25 GeV
- ≥2 jets p_T >25 GeV (≥1 or ≥2 b-tag)
- E_T^{miss} >40 GeV
- SF pair : M_{ll}>15 GeV, $|M_{ll}-M_Z|$ >10 GeV
- $H_T = \sum p_T^{lepton,jet}$ >550-650 GeV



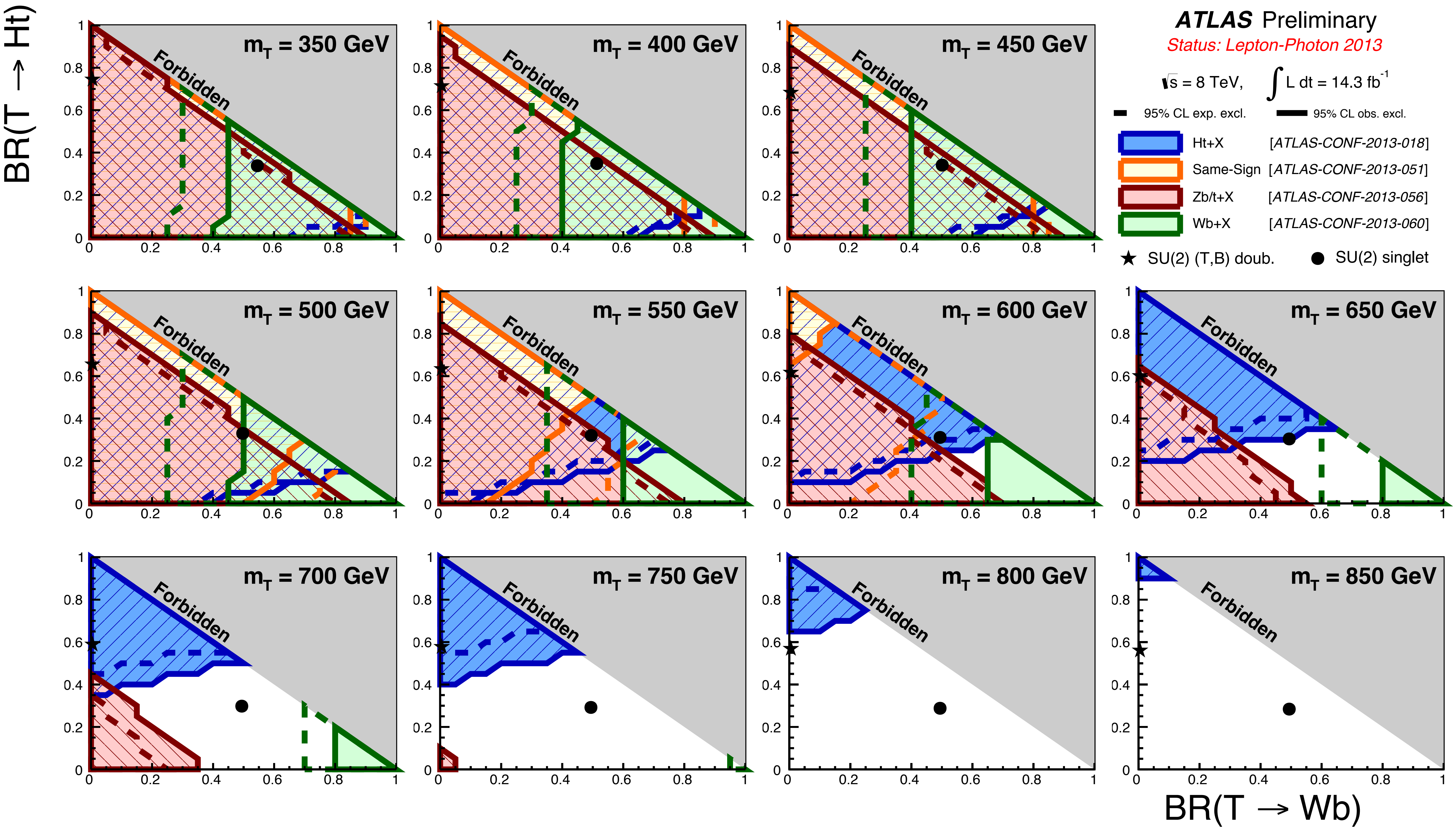
- Charge misidentification, fake lepton background estimated from data
- Real SS dilepton events (ttV, diboson) estimated from MC



SU(2) singlet b’ (500-650 GeV)		
Wt	Zb	Ht
42-45%	31-29%	27-26%

Limits also set for VLQ t’

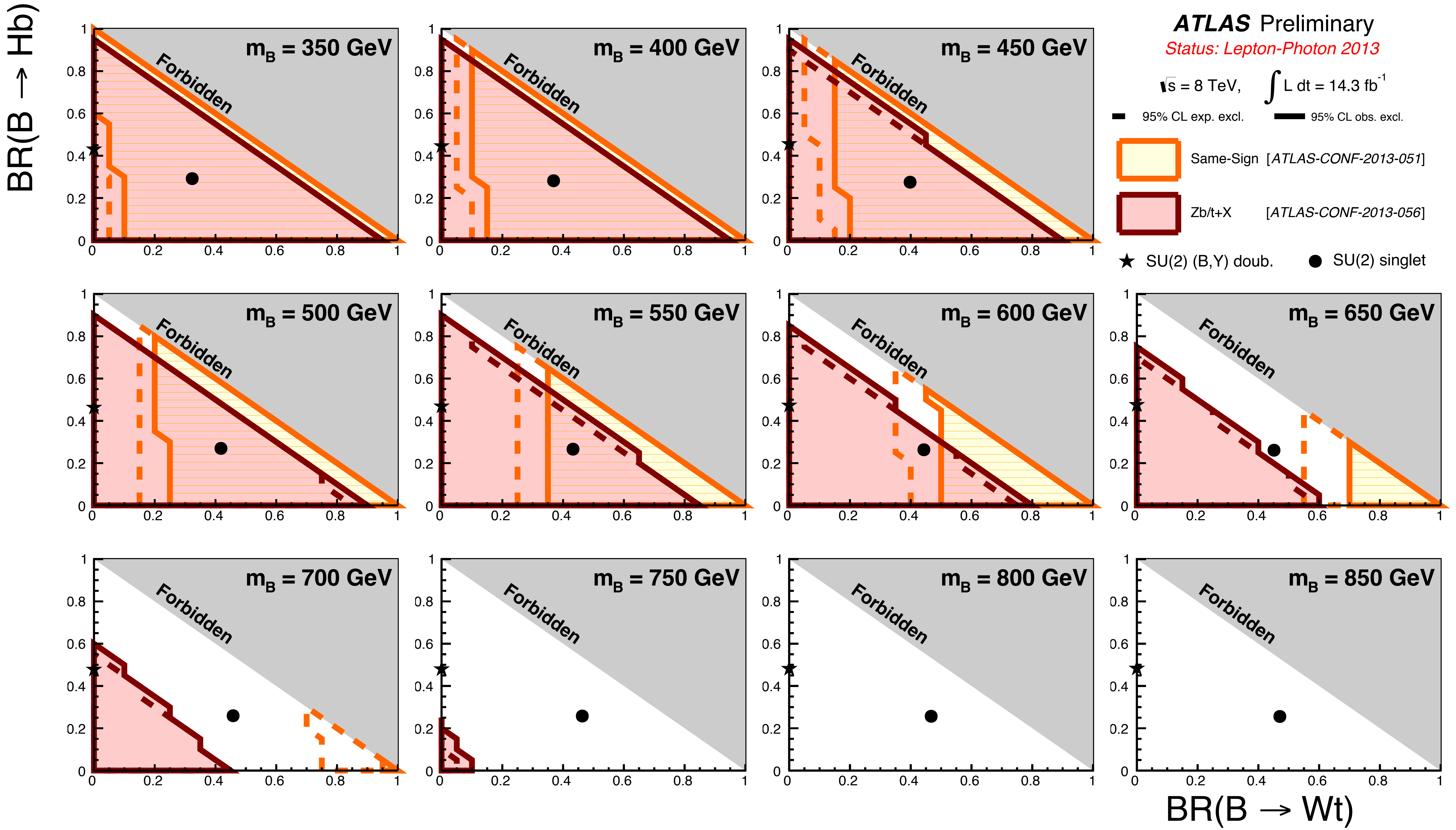
Top Partner : Summary



Top partner：~600 GeVまではほぼ全てのBr領域で棄却

➡ より高い質量領域での探索（単一生成での解析が進行中）

Bottom Partner : Summary



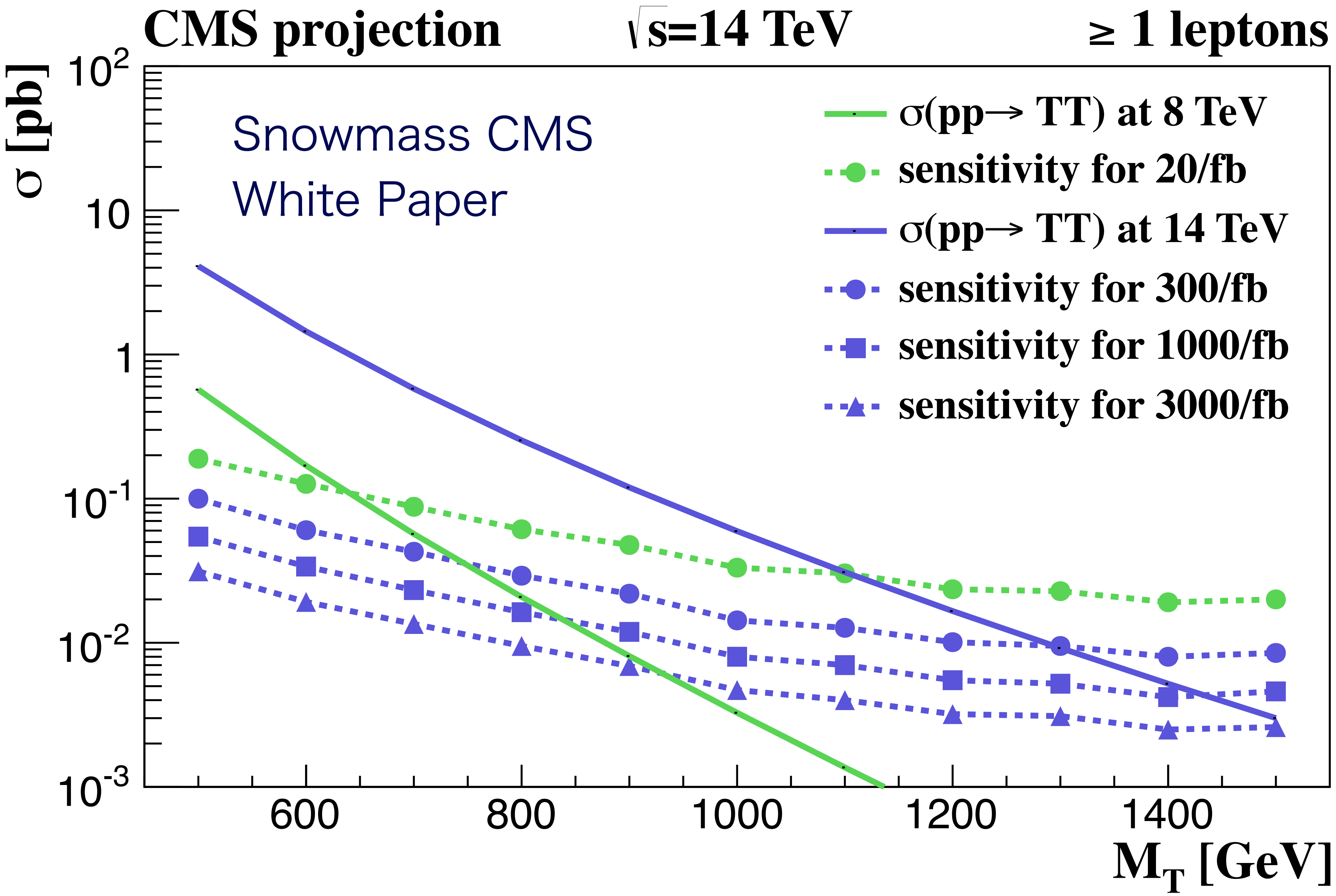
Bottom partner：~500 GeVまではほぼ全てのBr領域で棄却

VLQ at 14 TeV

arXiv:1307.7135

14TeVでのTop partnerの発見感度

- 8TeV解析をルミノシティー・断面積比でスケール
- 10(50)% systematics for tt(all other)バックグラウンド
- SU(2) singlet : Wb/Zt/Ht = 50%/25%/25%

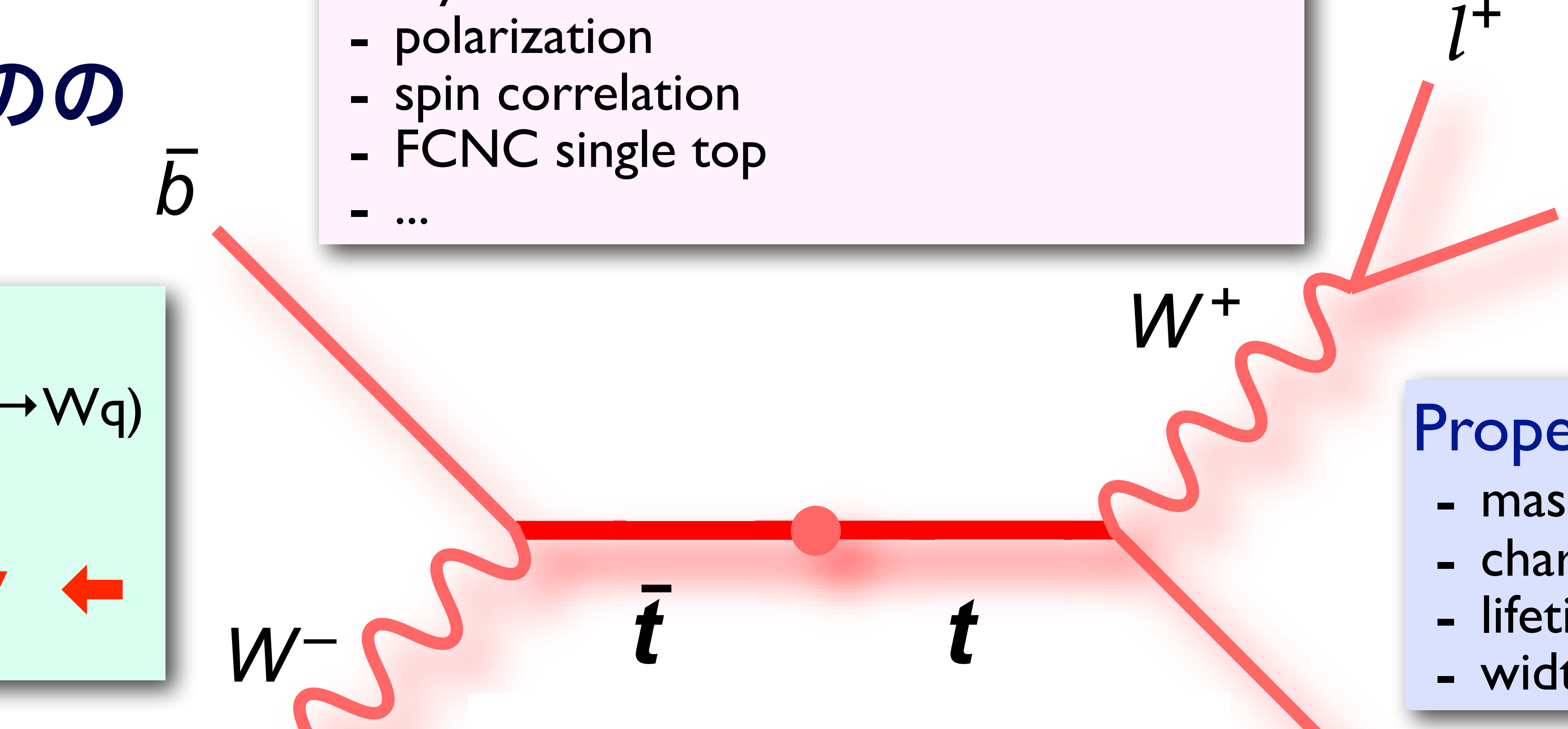


300(3000)fb^{-1}で、~1.3(1.5)TeVまで発見可能

Top

ちょっと寄り道。。。

トップそのものの
測定も面白い。



Production

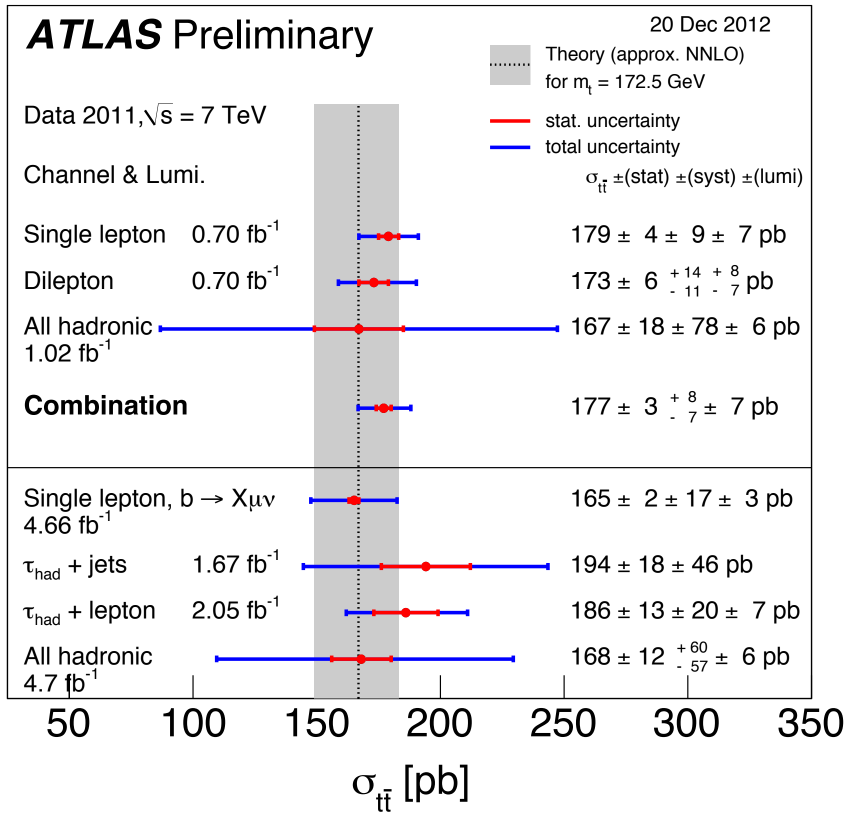
- cross section (total, **differential**) ⬅
- associated production
- asymmetries
- polarization
- spin correlation
- FCNC single top
- ...

Decay

- Br(t→Wb)/Br(t→Wq)
- W-helicity
- t→H^++b
- **FCNC decay** ⬅
- ...

Property

- mass
- charge
- lifetime
- width



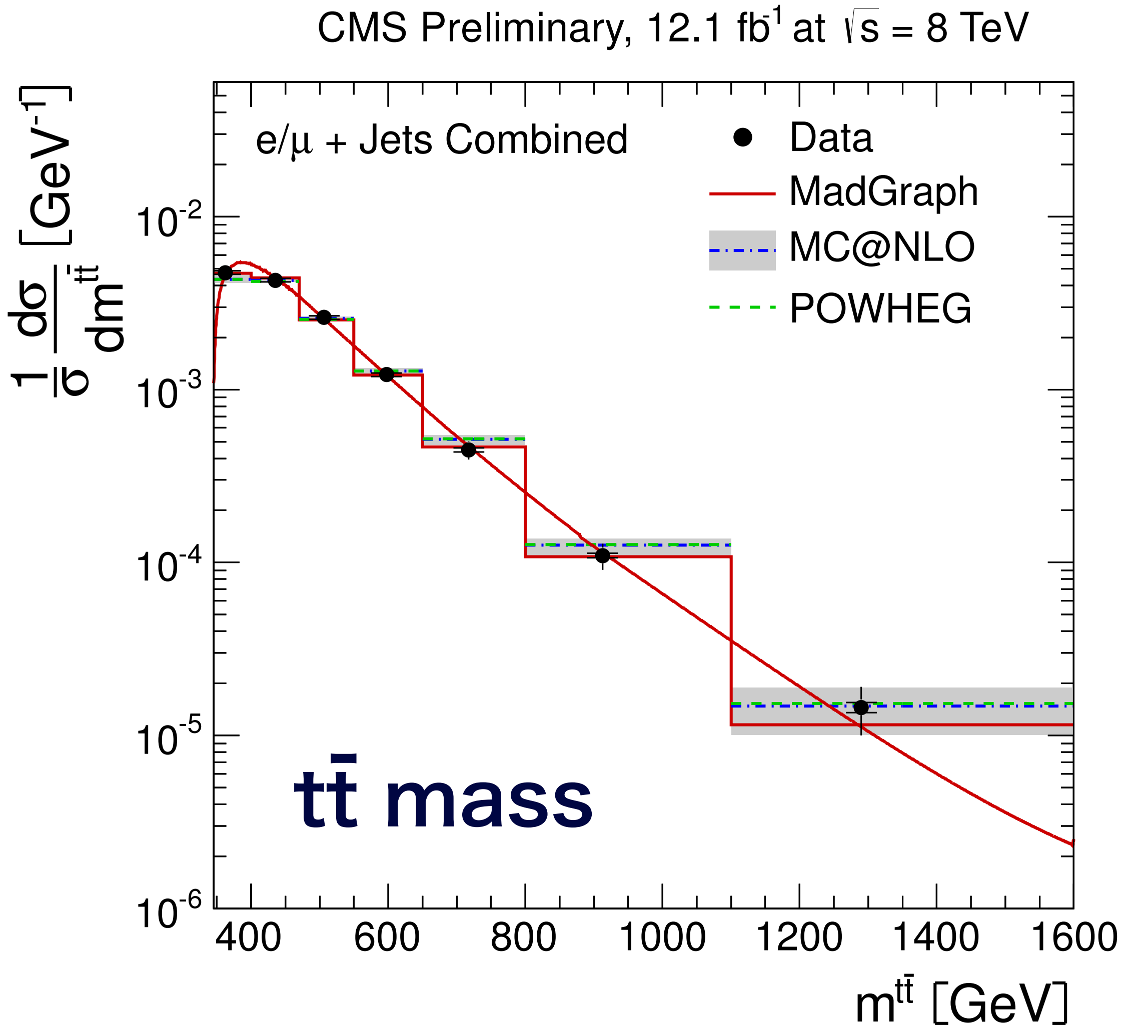
生成・崩壊・性質に標準模型からのずれはないか？

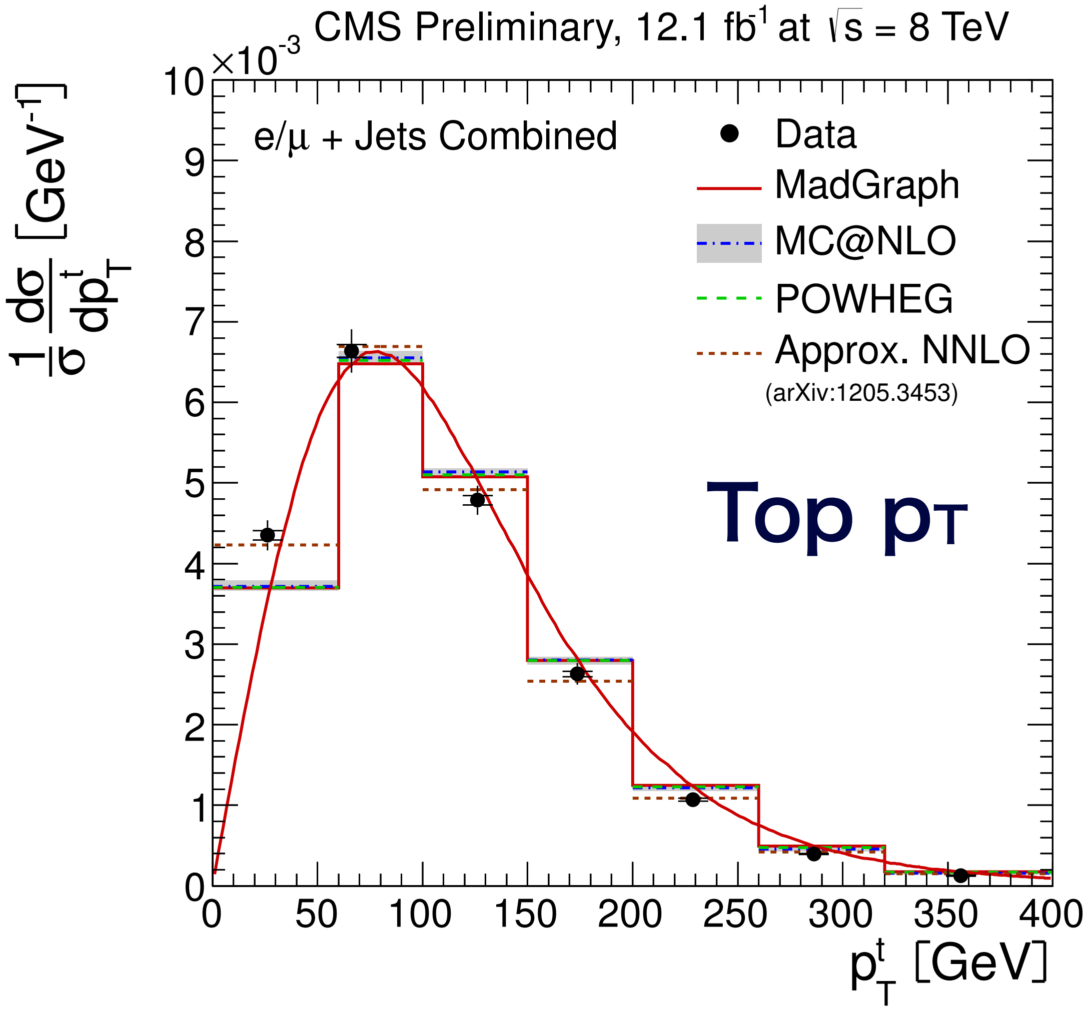
全断面積とNNLO QCD計算との比較

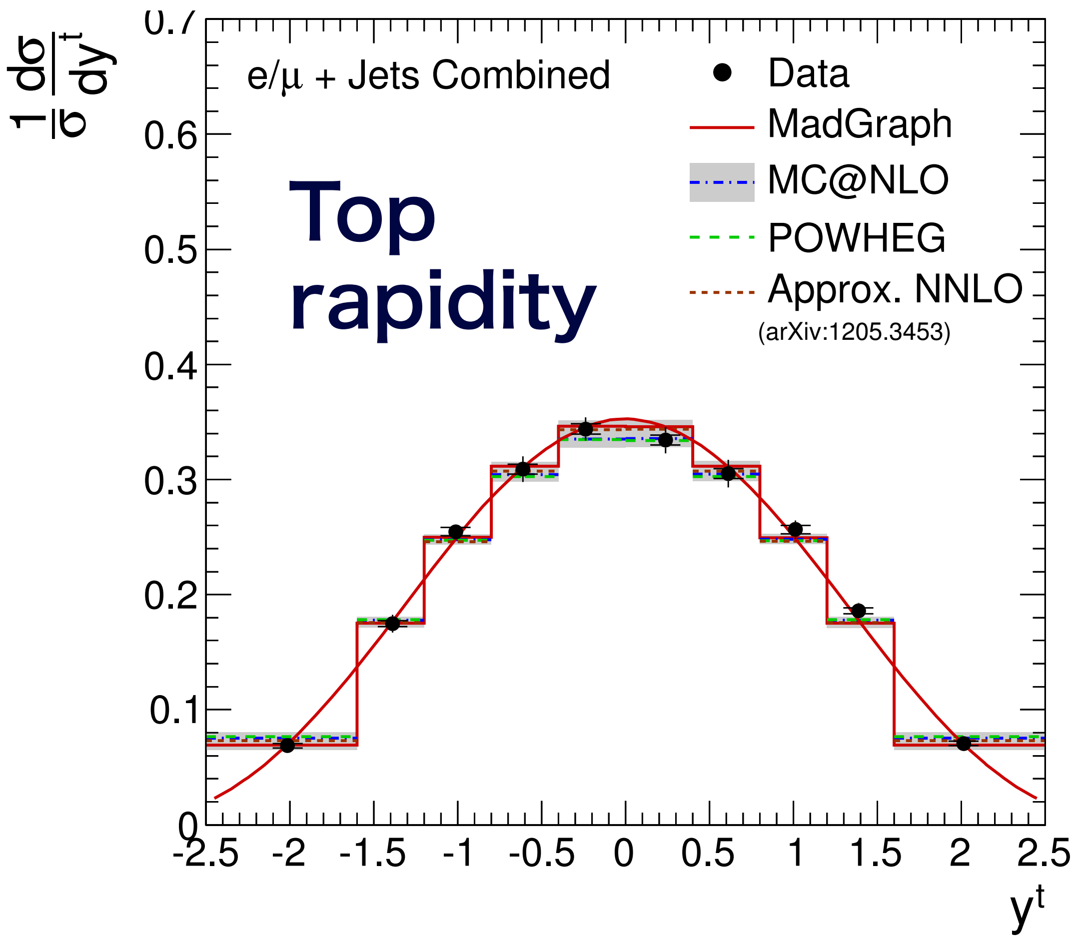
➔ 良い一致

Differential Top Measurement

arXiv:1211.2220







近似NNLO計算はデータを良く再現する

$$\Delta_{\rm tot}\left(\frac{1}{\sigma}\frac{d\sigma}{dm_{t\bar{t}}}\right) \sim 10\%\ (400{\rm GeV}) - 20\%\ (1{\rm TeV})$$

➡ 1TeV領域でも既に系統誤差がdominant

もっと高精度の測定ができれば面白い。

FCNC Top Decay

ATLAS-CONF-2013-081
CMS PAS TOP-12-037

トップクォークのFCNC崩壊に新物理の兆候が現れないか？

- SM ➡ **BR(t→cV)=10^{-14}**
- 2HDM, MSSM, Top-color assisted TCなど ➡ **BR(t→cV)=10^{8-10} x BR$_{SM}$**

予想	SM	2HDM-III	MSSM	TC2
t→cγ	4.6×10^{-14}	$\sim10^{-6}$	2.0×10^{-6}	$\sim10^{-6}$
t→cZ	1.0×10^{-14}	$\sim10^{-7}$	2.0×10^{-6}	$\sim10^{-4}$
t→cH	3.0×10^{-15}	$\sim10^{-3}$	10^{-5}	-

現在の制限

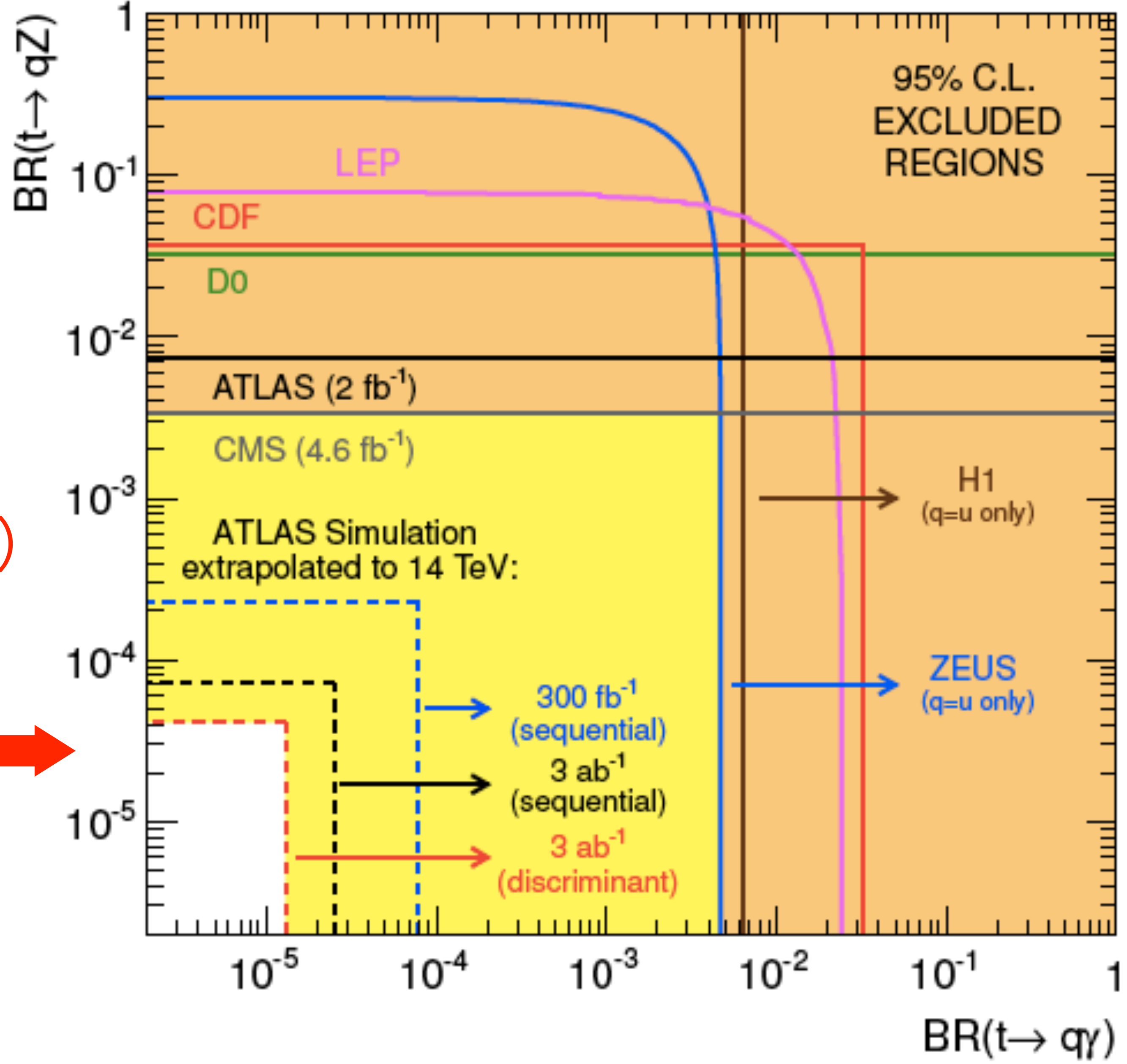
- BR(t→qZ) < 7×10^{-4} (CMS, 20 fb^{-1})
- BR(t→cH) < 8.3×10^{-3} (ATLAS, 20 fb^{-1})

3000 fb^{-1}（~500M tt→l+jets events!)で到達可能なBRの予想

- **BR(t→cγ) ~ 10^{-5}**
- **BR(t→cZ) ~ 5×10^{-5}**

Snowmass ATLAS White Paper
(arXiv:1307.7292)

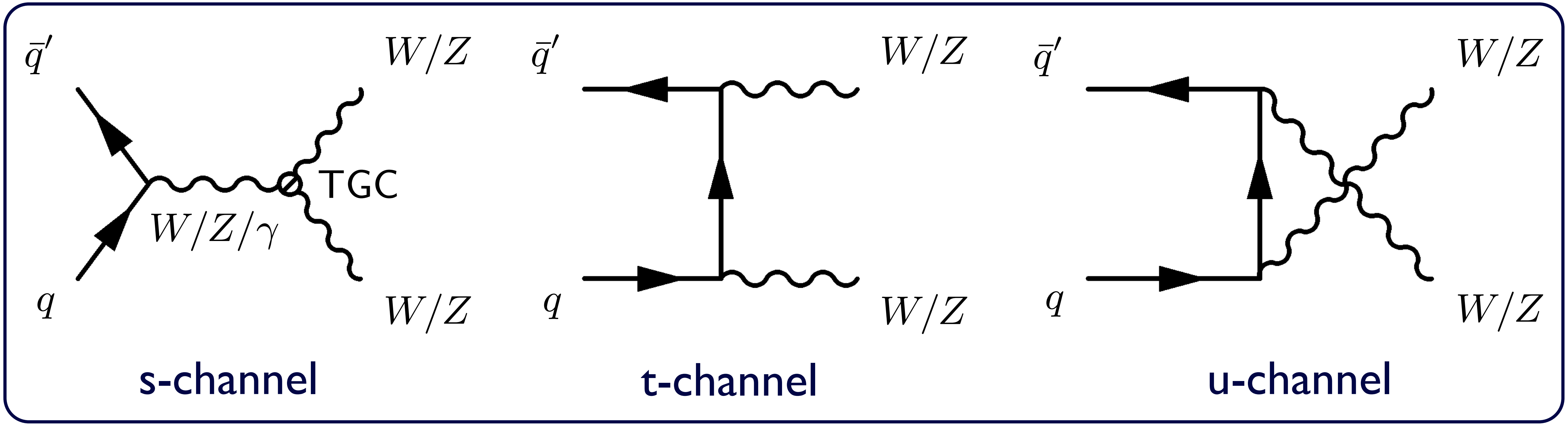
q = u or c



Vector Boson Scattering

Diboson Production

LO diagrams for WW/WZ/ZZ production



- **SM生成過程の検証**
  ⇒ ヒッグス、BSM探索のバックグラウンド
- **NLO計算（MCFM with NLO PDF）との比較**
- **３点ゲージ結合（TGC）に対するプローブ**
  ⇒ 新物理からの寄与 → 異常３点ゲージ結合（anomalous TGC)

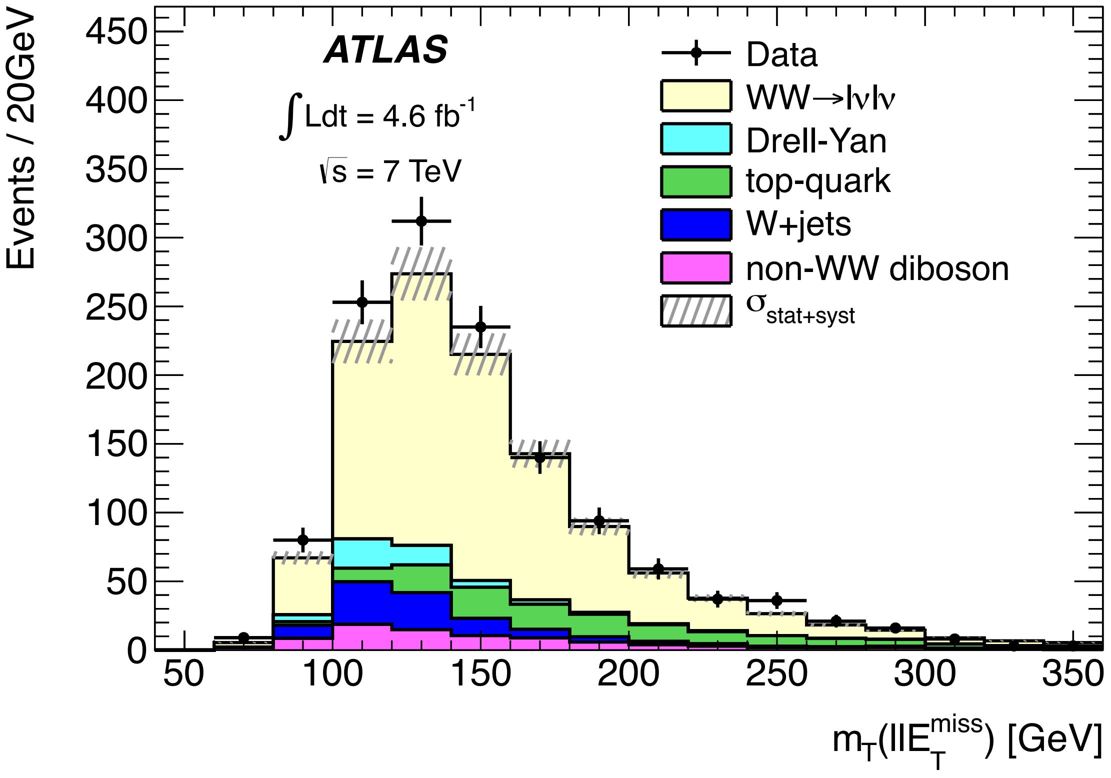
Diboson Measurement

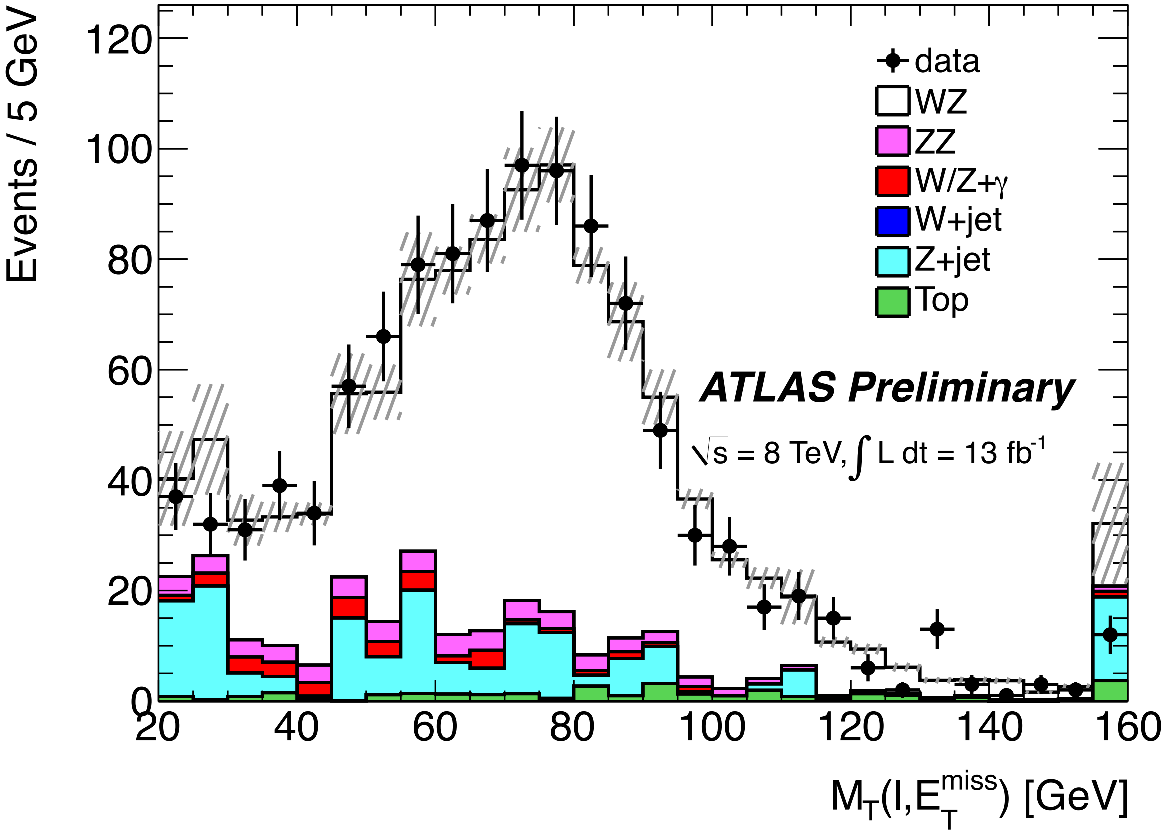
WW selections

- Opposite-sign high-p_T isolated leptons
- Large E_T^{miss} (to suppress Z)
- Jet veto (to suppress tt)

WZ selections

- 3 high-p_T isolated leptons
- Opposite-sign leptons from Z
- 3rd lepton + E_T^{miss} for W
- Large E_T^{miss} and M_T^W

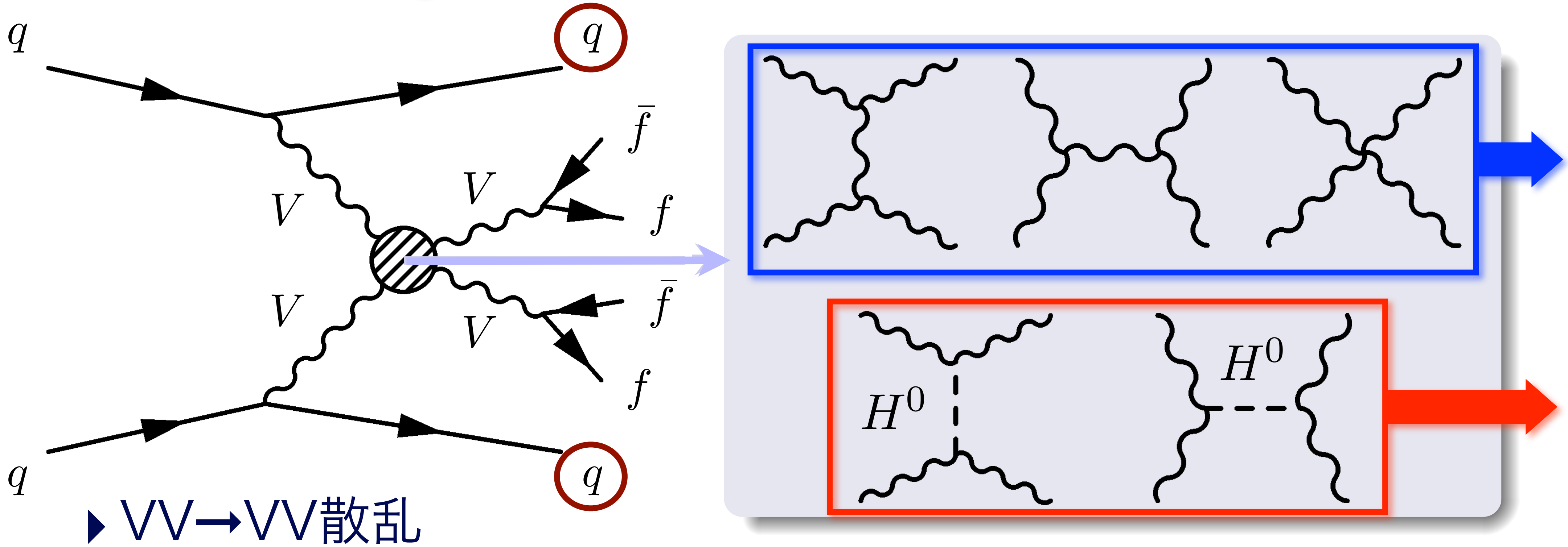




Process	√s	σ_{meas} [pb]	stat	syst	lumi	σ_{theory} [pb]		Reference
WW	7 TeV	51.9	±2.0	±3.9	±2.0	44.7	+2.1 -1.9	PRD 87, 112001 (2013)
WZ	8 TeV	20.3	+0.8 -0.7	+1.2 -1.1	+0.7 -0.6	20.3	±0.8	ATLAS-CONF-2013-021
ZZ	8 TeV	7.1	+0.5 -0.4	±0.3	±0.2	7.2	+0.3 -0.2	ATLAS-CONF-2013-020

Vector Boson Scattering (I)

Longitudinal VBS ➡ EWSBセクターの直接検証



散乱振幅 (E ≫ M_H)

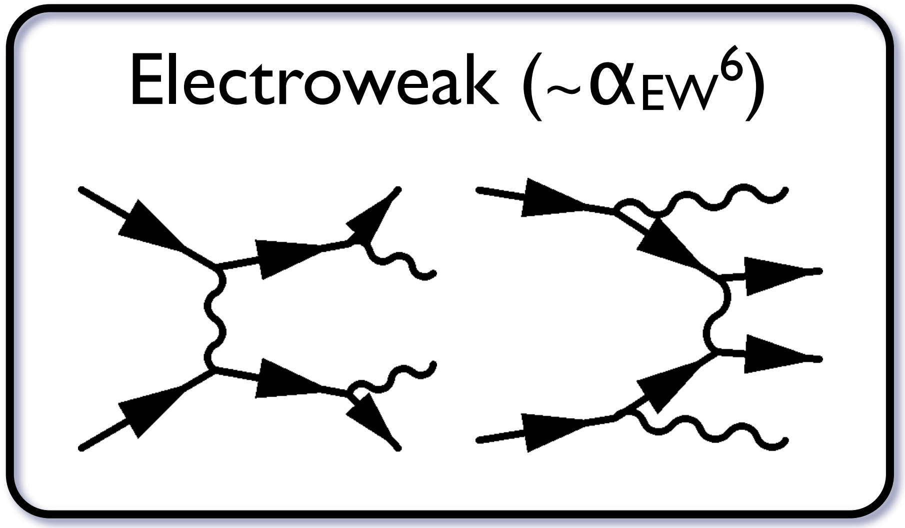
$$A \sim g^2 \frac{E^2}{M_W^2}$$

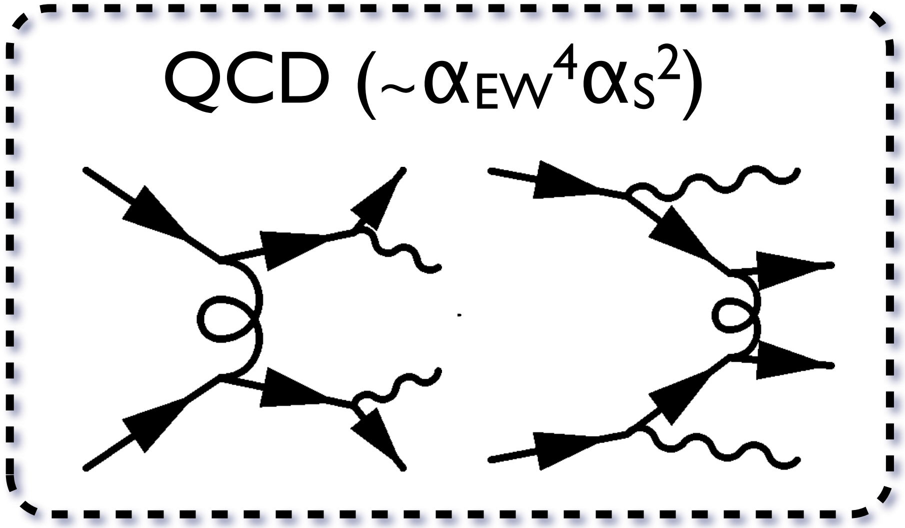
$$A \sim -g^2 \frac{E^2}{M_W^2}$$

- VV→VV散乱
- 前後方へのクォーク由来ジェット

- ３点/４点ゲージ結合からの寄与
- ヒッグスの交換・生成過程

終状態にVV+jjを作るNon-VBSバックグラウンド過程


Electroweak (~α_{EW}^6)


QCD (~$\alpha_{EW}^4\alpha_S^2$)

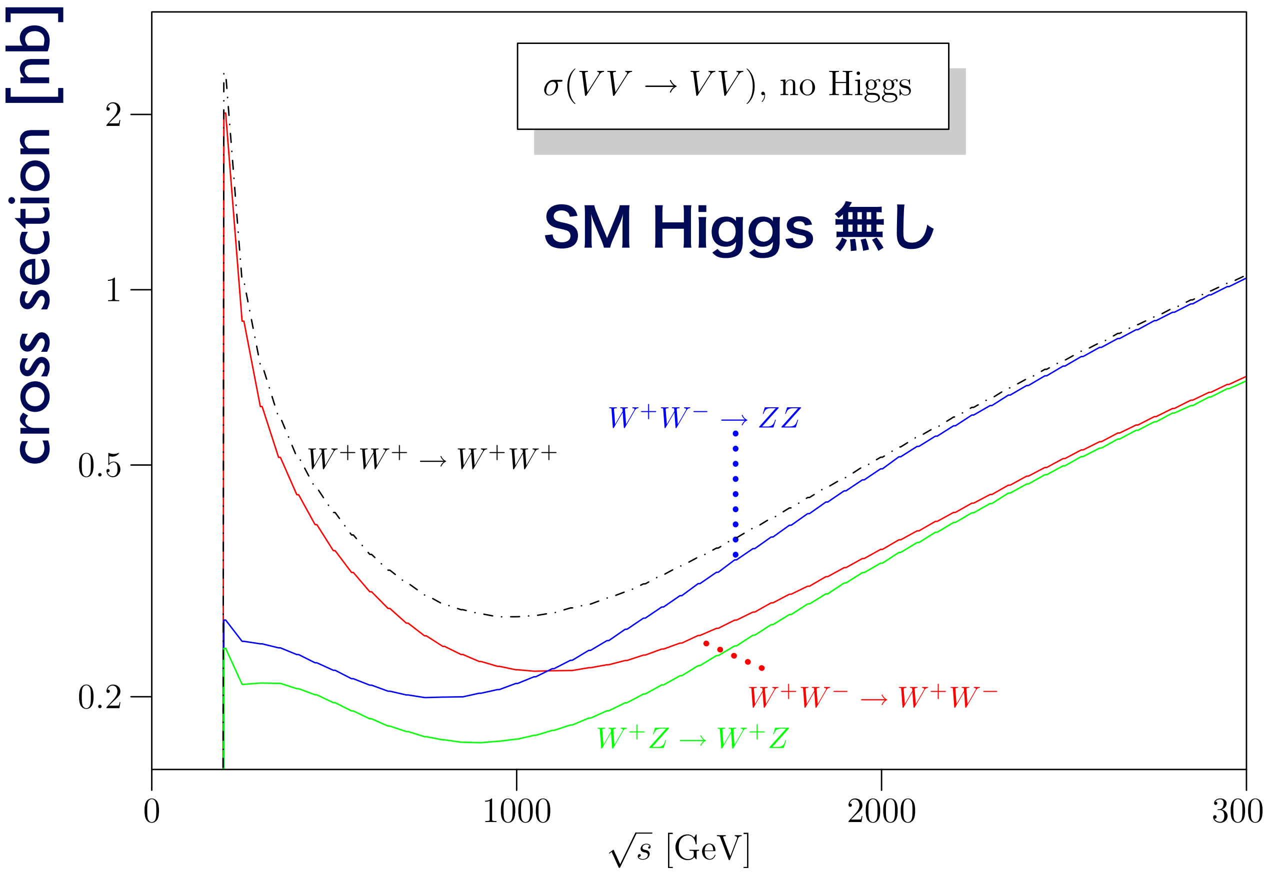
Vector Boson Scattering (II)

arXiv:0806.4145

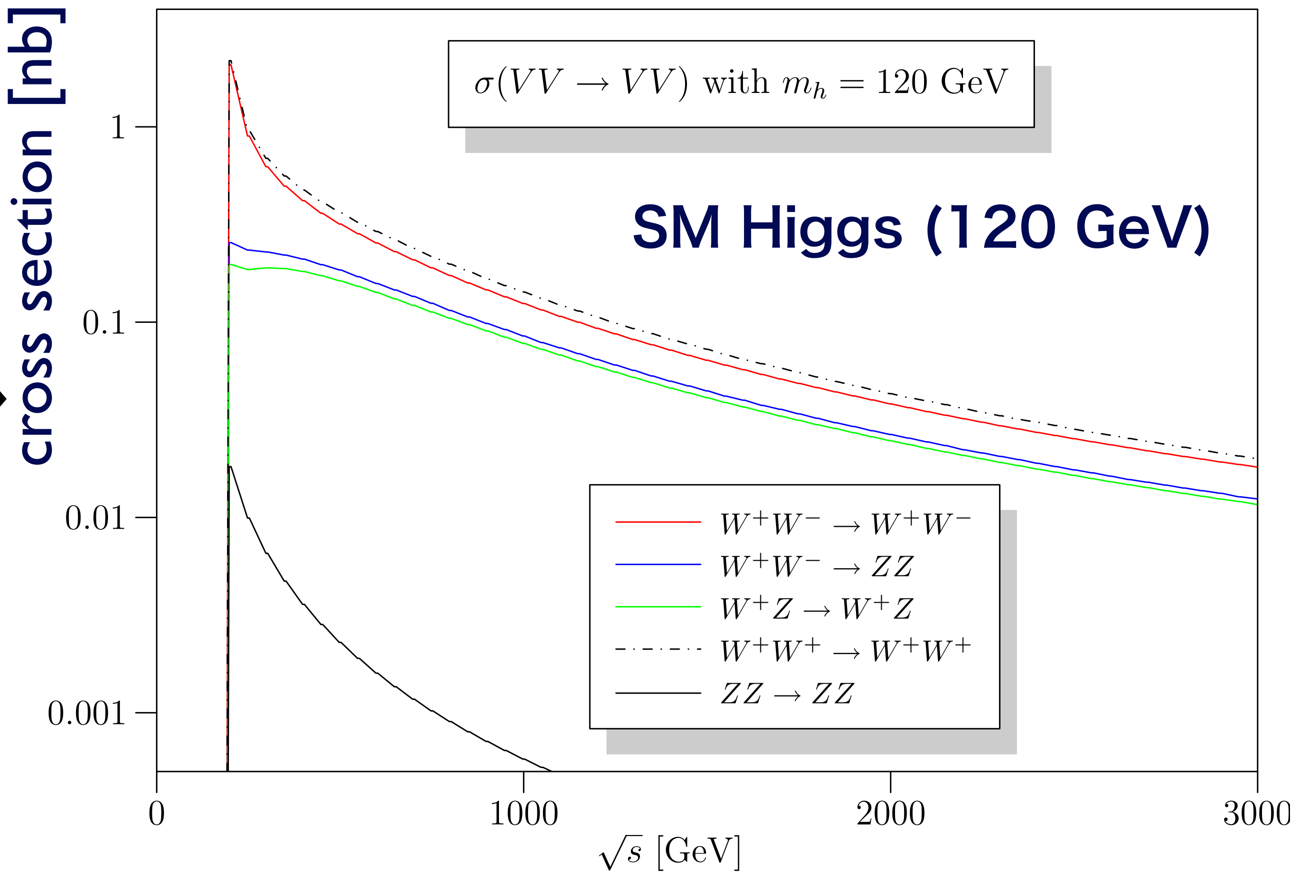
Unitarity in VV scattering

- V_LV_L scattering w/o a light SM Higgs → Unitarity violation at $\sqrt{s}\approx 1.2$ TeV
- Unitarity restored with a specific coupling to VV if only one resonance
  例）**SM Higgs**

$$A(W_L^+W_L^- \to W_L^+W_L^-) \approx \frac{1}{v^2}\left(s+t-\frac{s^2}{s-M_H^2}-\frac{t^2}{t-M_H^2}\right)$$



SM Higgs 無し



SM Higgs (120 GeV)

$\sigma_{VV\to VV}$の$\sqrt{s}$依存性 ($\sqrt{s}\gtrsim$1TeV) を検証する

Vector Boson Scattering (III)

arXiv:0806.4145

- Unitarity also restored with a unique combination of couplings and resonances that plays a role of "SM Higgs"

例）**Technicolor, 2HDM, ...**

$$\sum_i g^2_{X_i WW} = g^2_{H_{SM}WW} = \left(\frac{2M_W^2}{v}\right)^2$$

新しい共鳴状態が現れる可能性？

	$J=0$	$J=1$	$J=2$
$I=0$	σ^0 (Higgs)	ω^0 (γ'/Z')	f^0 (Graviton?)
$I=1$	$\pi^\pm, \pi^0$ (2HDM?)	$\rho^\pm, \rho^0$ (w'/Z')	$a^\pm, a^0$
$I=2$	$\phi^{\pm\pm}, \phi^\pm, \phi^0$ (Higgs triplett?)		$t^{\pm\pm}, t^\pm, t^0$

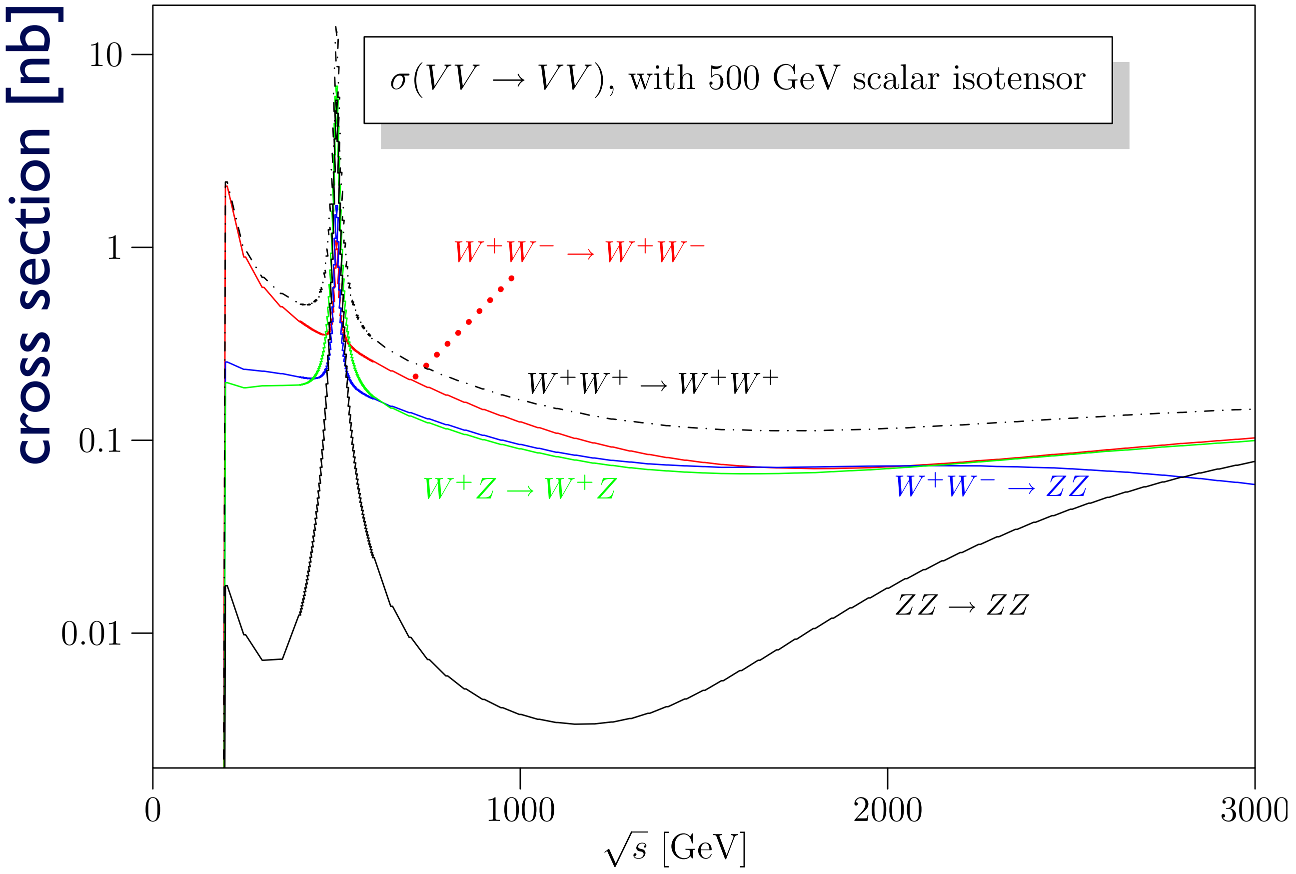
126GeV HiggsがSM結合を持つと仮定

➡ **Unitarity結合を仮定した共鳴状態の質量制限?**

126GeV HiggsがSM結合を持つと想定

➡ **VV共鳴結合の制限 (質量の関数)?**

√s=14TeVでVV散乱への新物理の寄与は見えるか？



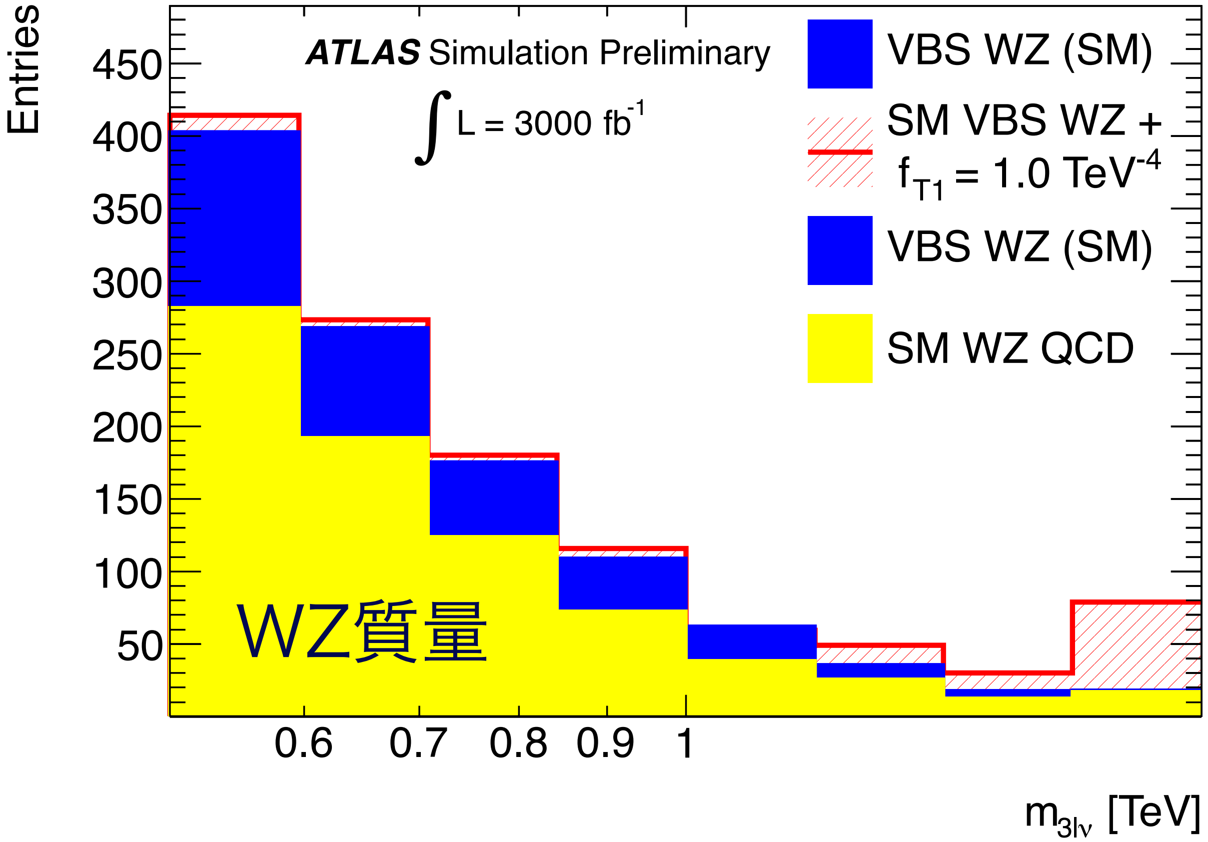
VBS WZ → *lνll* at 14 TeV

ATL-PHYS-PUB-2013-006

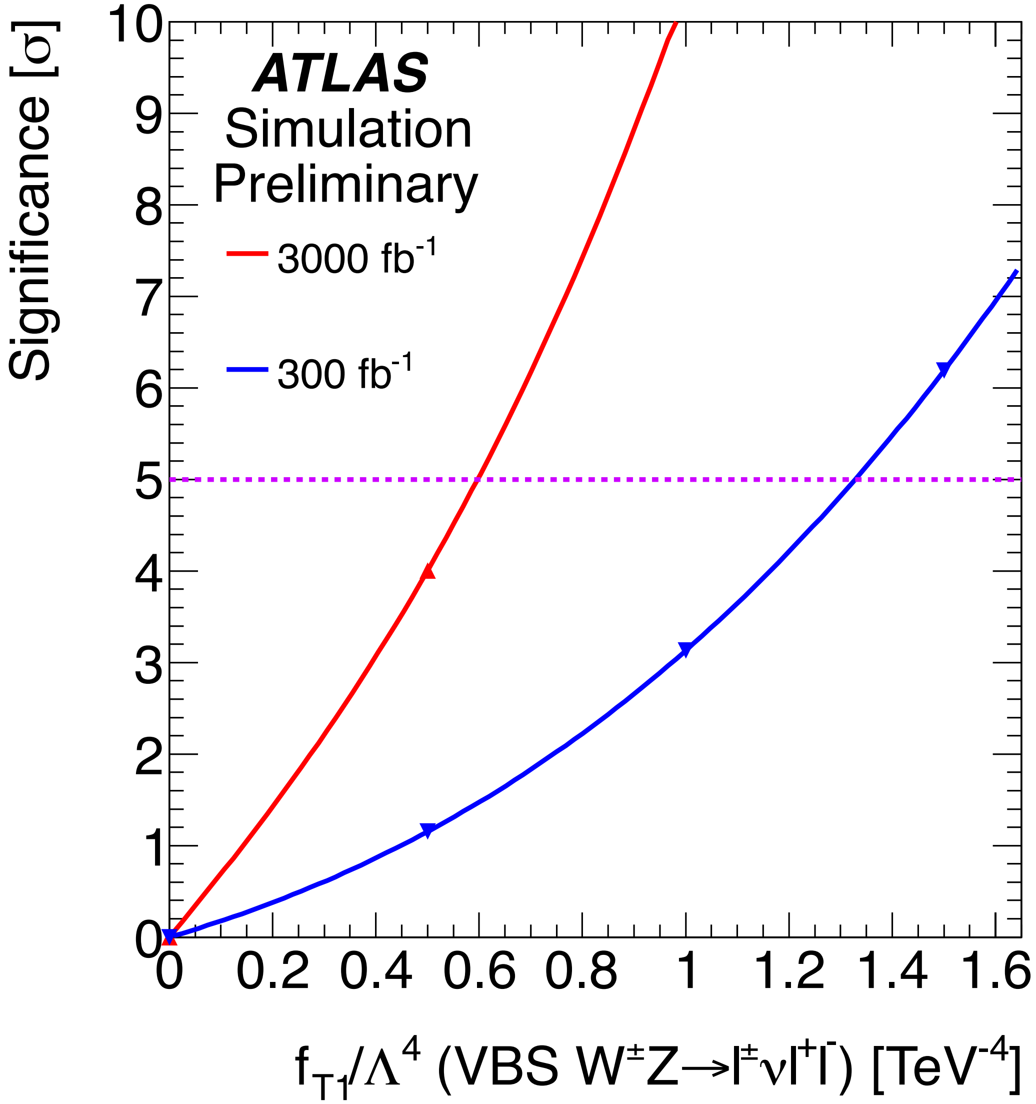
WZ→3-lepton channel

- Exactly 3 high-p_T leptons
- 1 OS-SF lepton pair forming Z
- ≥2 jets (p_T >25 GeV) with M_{jj} > 1 TeV

- Neutrino p_Z using W-mass constraint from unpaired lepton
- Small "fake" lepton background



~50 VBS WZ events (M_{WZ} > 1 TeV) at 3000 fb^{-1}



5σ discovery sensitivity for dim.-8 operator

$$\mathcal{L}_{T,1} = \frac{f_{T1}}{\Lambda^4} \mathrm{Tr}[\hat{W}_{\alpha\nu}\hat{W}^{\mu\beta}] \times \mathrm{Tr}[\hat{W}_{\mu\beta}\hat{W}^{\alpha\nu}]$$

	300 fb^{-1}	3000 fb^{-1}
f_{T1}/Λ^4	1.3 TeV^{-4}	0.6 TeV^{-4}

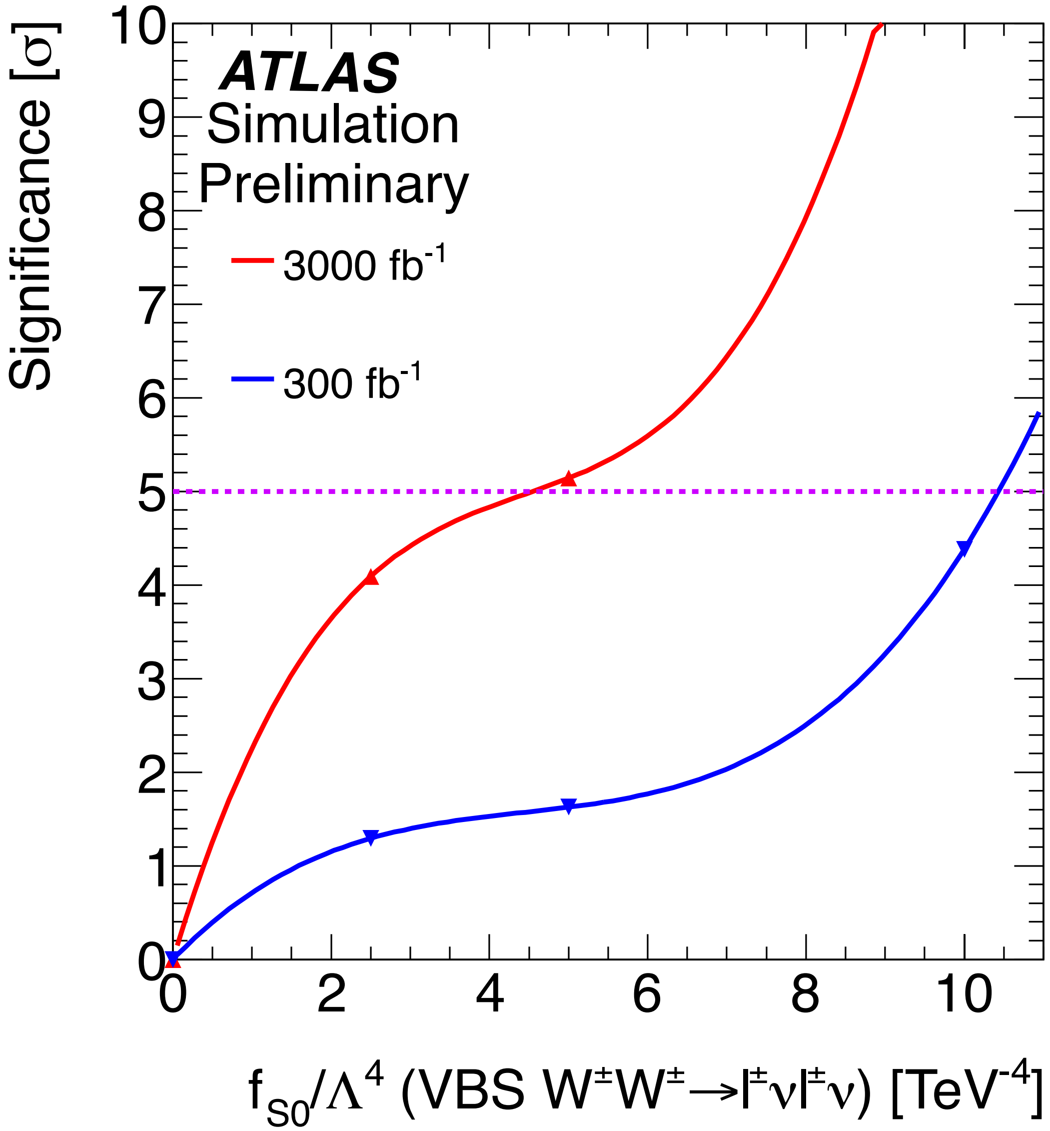
VBS $W^\pm W^\pm \to l^\pm \nu l^\pm \nu$ at 14 TeV

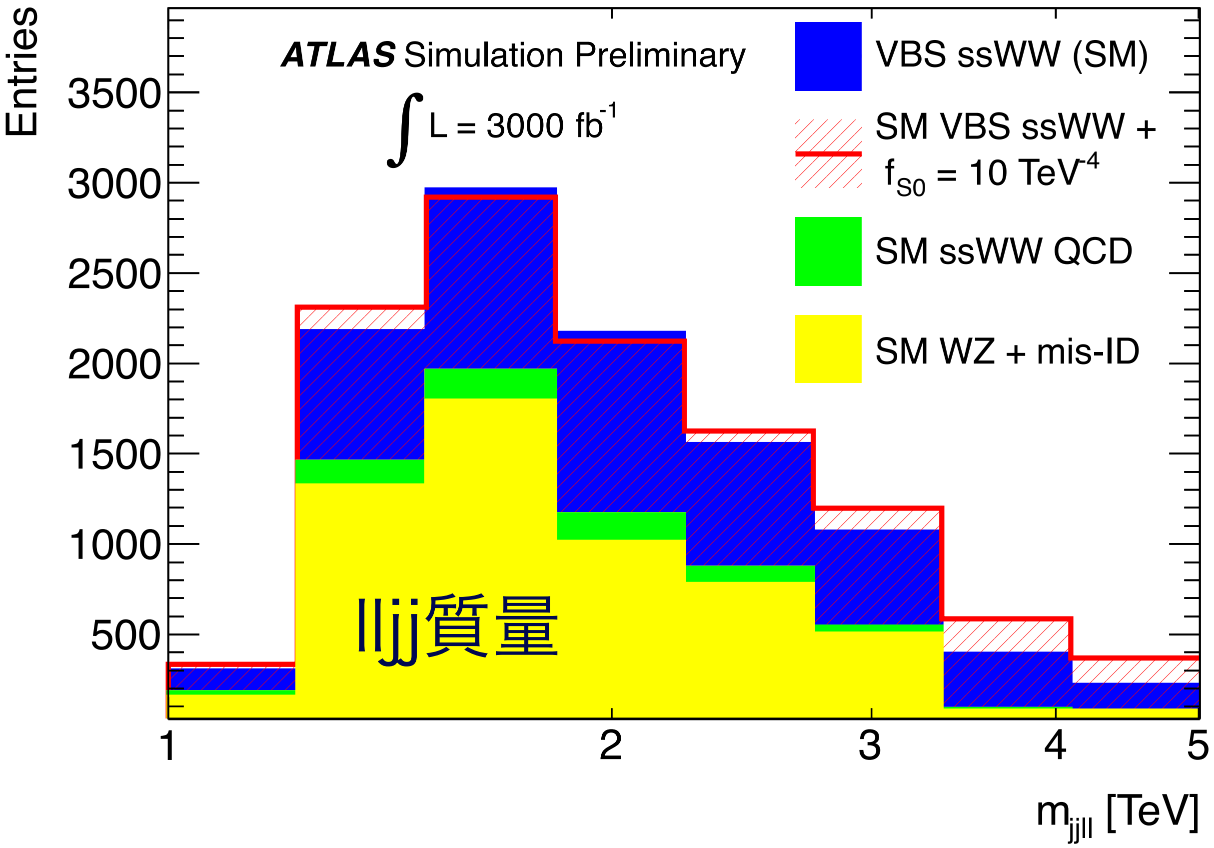
ATL-PHYS-PUB-2013-006

Same-sign WW→2-lepton channel

- Exactly 2 high-p_T same-sign leptons
- ≥2 jets (p_T >50 GeV) with M_{jj} > 1 TeV

- Same-sign QCD ($\sim\alpha_{EW}^4\alpha_S^2$) WW process estimated from MadGraph
- "Fake" lepton and charge flip background estimated by scaling WZ background (based on 8 TeV analysis)





5σ discovery sensitivity for dim.-8 operator

$$\mathcal{L}_{S,0} = \frac{f_{S0}}{\Lambda^4}\left[(D_\mu\phi)^\dagger D_\nu\phi\right] \times \left[(D^\mu\phi)^\dagger D^\nu\phi\right]$$

	300 fb^{-1}	3000 fb^{-1}
f_{S0}/Λ^4	10 TeV^{-4}	4.5 TeV^{-4}

Summary

Resonance (W’, Z’, ρ, g^{KK})

- **多くの終状態で、質量にして約2TeVの制限がついている**
- **14TeV (3000 fb^{-1}) では5-7TeV程度まで発見/棄却可能**
  - 直接探索の限界に近づく？(→ HE-LHC?)
  - 正直な話、それまでに何か見つかっていて欲しい 。。。

Vector-like Quark

- **約600GeV程度までは、Brに関わらず棄却（トップパートナー)**
- **単一生成過程でどこまで制限を伸ばせるか？**
- **14TeV (3000 fb^{-1}) では1.5TeV程度まで発見が可能**

Vector Boson Scattering

- **8TeVではEW VBS VVjj過程 (特に$W^{\pm}W^{\pm}$) の観測が限度**
- **14TeVでどこまで$\sigma_{VV\to VV}(\sqrt{s})$を測定できるかはこれからの研究しだい**