



アニメーションを用いた関係で pdf 化した際に見づらくなっています。
マイクロソフトパワーポイント版が必要な方は東大 ICEPP 奥村
(yasuyuki.okumura@cern.ch) までご連絡ください。

Exotic まとめ

奥村恭幸

東京大学 ICEPP

新学術の研究会（4月7日）@ 東大

素粒子物理：ヒントと対策

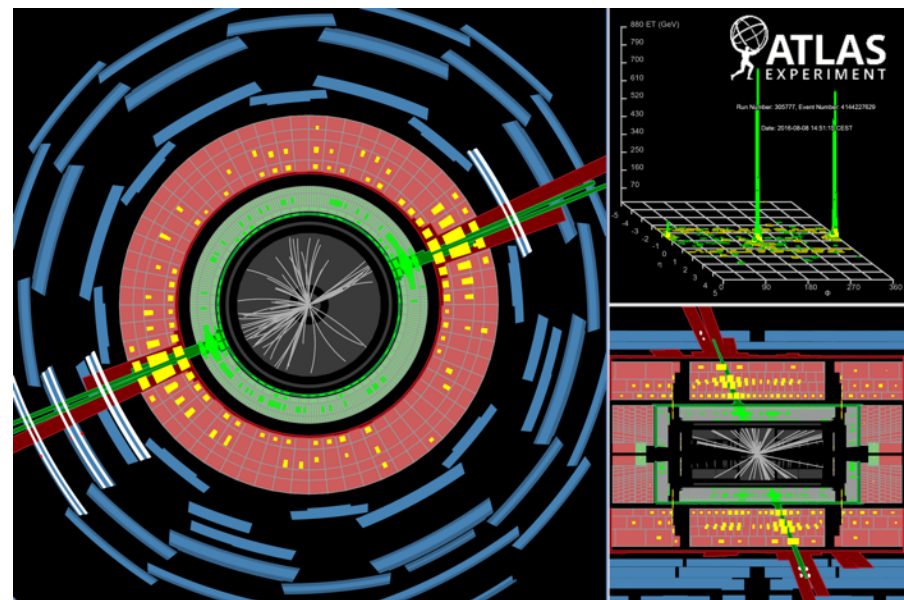
- いくらかのヒント：
 - 125 GeV ヒッグス粒子と階層性問題
 - ヒッグス粒子は本当にただ一つ？
 - ダークマター候補の不在
 - **対策：LHC のデータでくまなく**
“共鳴” や “不自然な tail” を探しましょう
- あり得る解の例： 超対称性、重力余剰次元、SM 素粒子の composite models
- 調べるべき現象 @ LHC：
 - 新粒子・新共鳴
 - 共鳴 (全てが観測可能な粒子の場合)
 - 特徴的な運動学を持ったイベントの超過 (e.g. Large Missing ET)

お品書き

- General なトポロジーベースでの新現象探索
 - dijet 共鳴探索 (BF 大きい, ff, VV, Vf を手広くカバー)
 - レプトニックな W' , Z' 探索 (BG がよく制御できる)
 - 弱ボソン終状態 (物理の構造がよく分かる)
 - 特にハドロニック終状態で探索 (BF が大きい)
 - Boosted object が必須
 - 特定の“ヒント”に注目した探索戦略
 - 第三世代クォークに注目をした探索
 - Vector Like Top Quark 探索
 - ダークマターに注目をした探索
 - Missing + photon
 - Missing + higgs
 - 2 jets
-

2 jets 共鳴探索

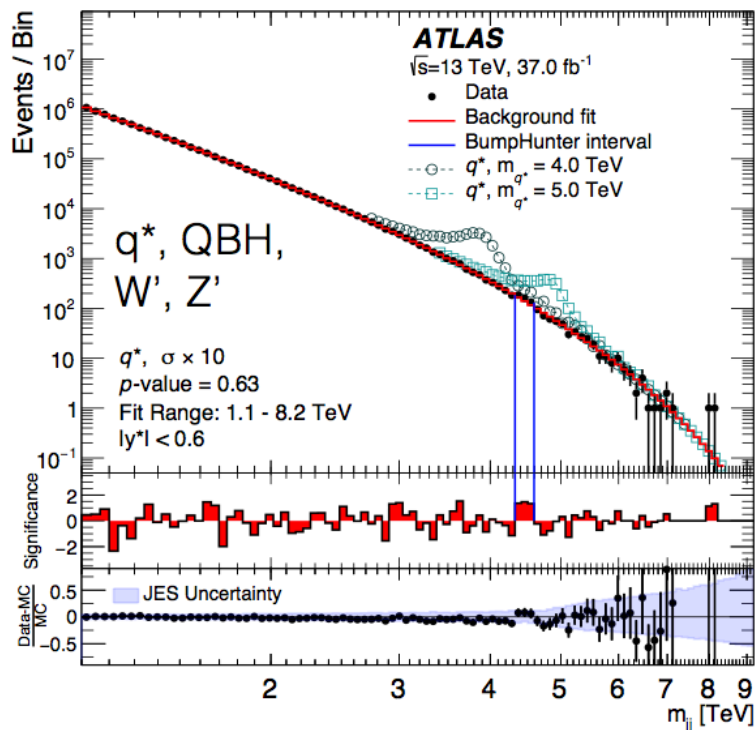
- ハドロンコライダーでの新物理探索の最右翼
 - 新粒子の 2-jet 終状態への BF は一般に大きい
 - カラーの自由度のおかげ
 - 幅広い物理をカバー (グルーオン / クォーク)
 - Spin0, 1, 2, $\frac{1}{2}$, QBH
- “High mass” 探索
 - マルチ TeV の共鳴
 - 余剰次元 & 量子重力 (QBH / KK Graviton)
 - 複合クォーク模型
 - Smooth falling background スペクトラム上の bump
 - Sliding window fit



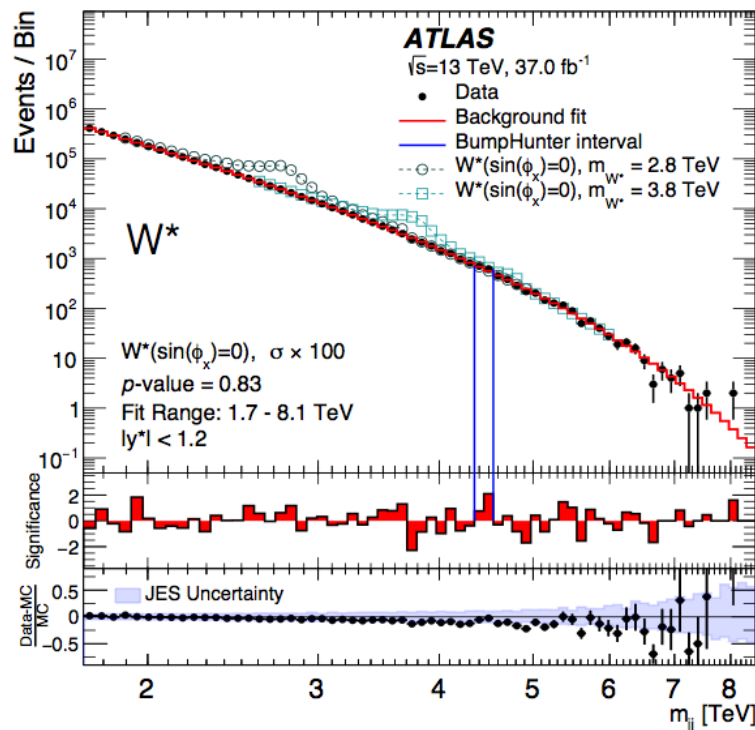
$M_{jj} = 8.1 \text{ TeV}$

2 jets 共鳴探索

- シングルジェットトリガー @ 380 GeV
- $p_T > 440$ GeV, 60 GeV
- Rapidity difference ($|y^*|$) カット (s-channel 的な信号)



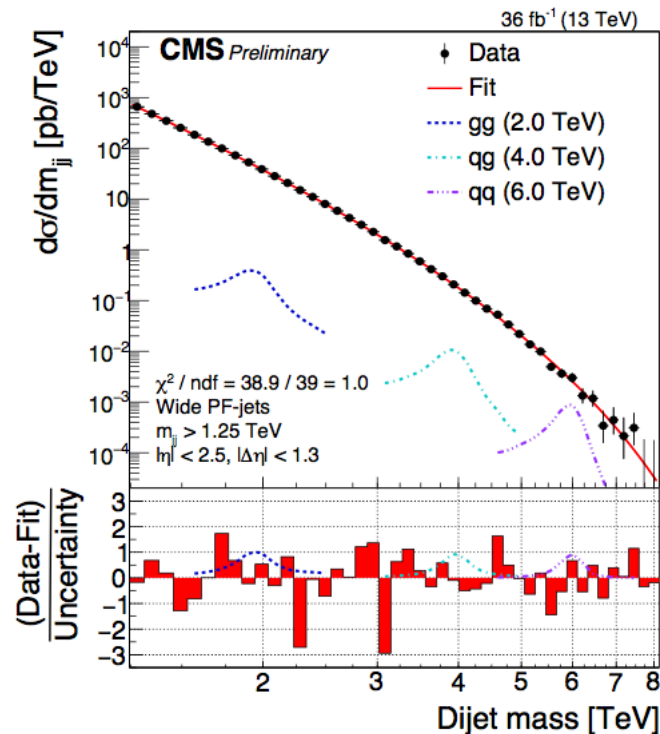
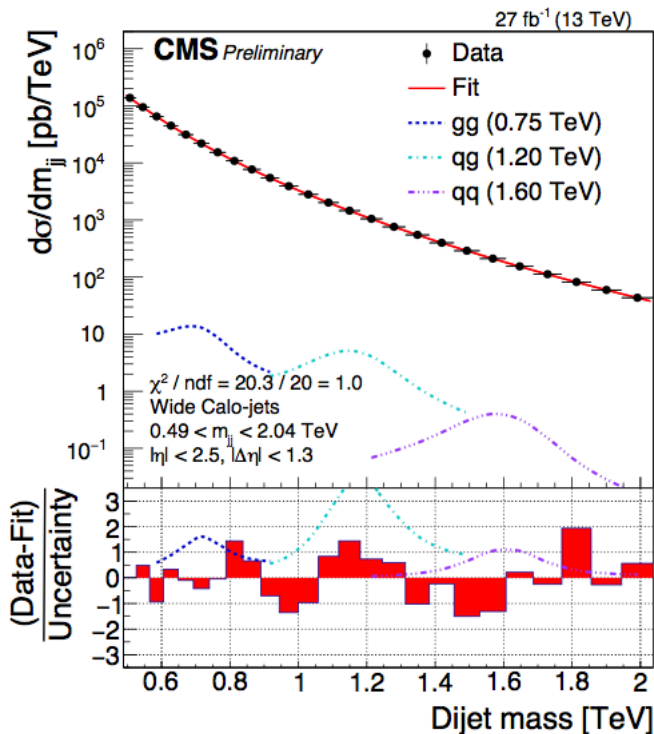
(a) $|y^*| < 0.6$ selection



(b) $|y^*| < 1.2$ selection

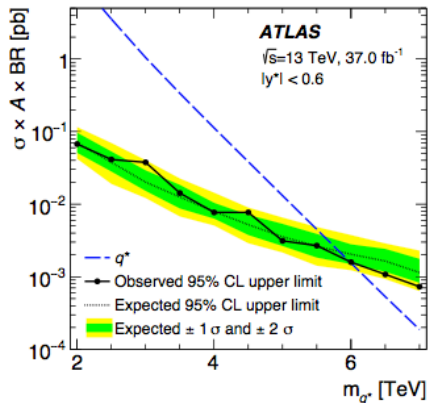
2 jets 共鳴探索 (CMS)

- $M_{jj} = 500 \text{ GeV} - \text{multi TeV}$ までを探索
 - Low mass 解析 : High level trigger object (27 fb^{-1})
 - “data scouting” HT cut $800 \text{ GeV} \rightarrow 250 \text{ GeV}$
 - High mass 解析 : 似たような offline ベースの解析 (36 fb^{-1})

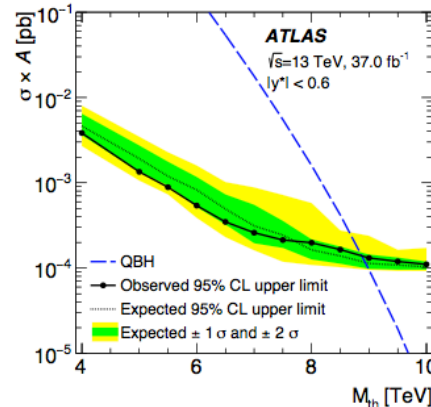


2-jet limit

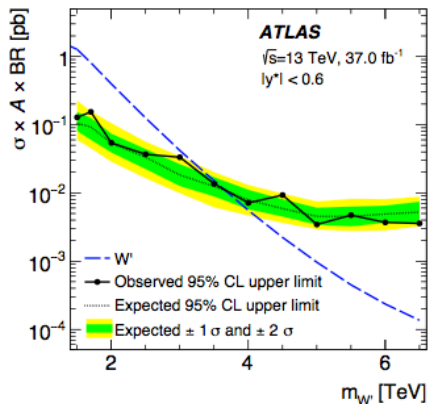
- ちょっとだけ approach が違うので注意



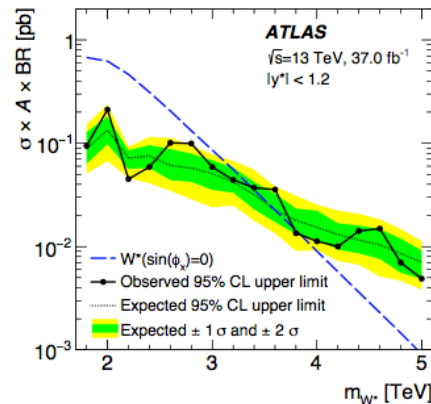
(a) q^*



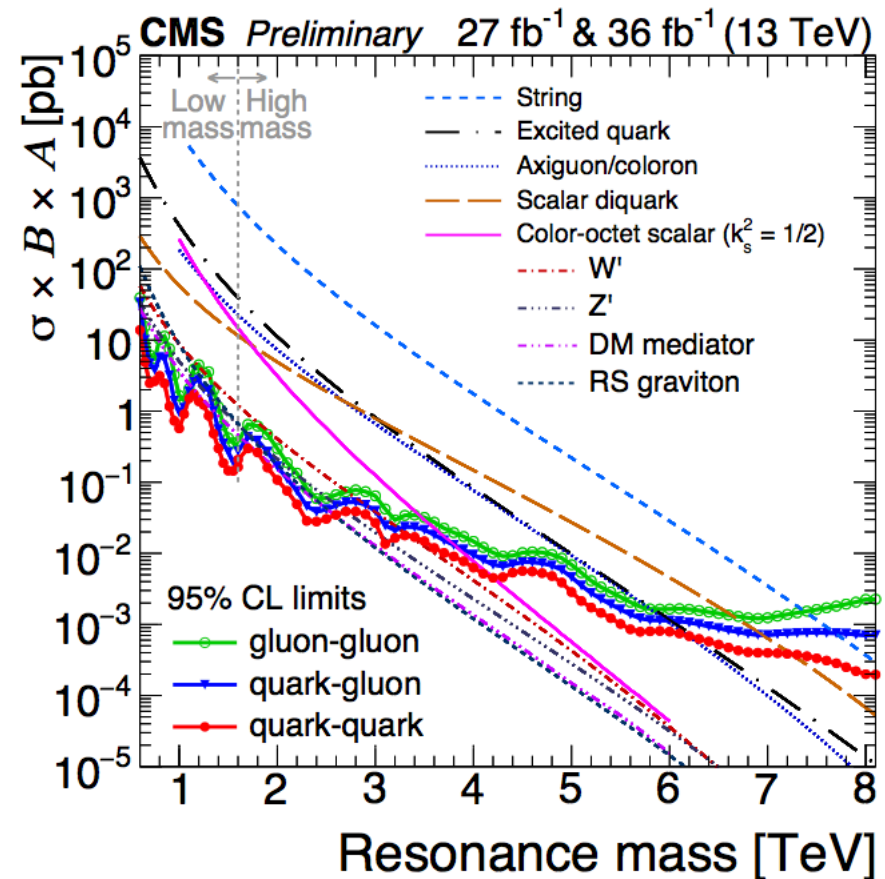
(b) QBH



(c) W'

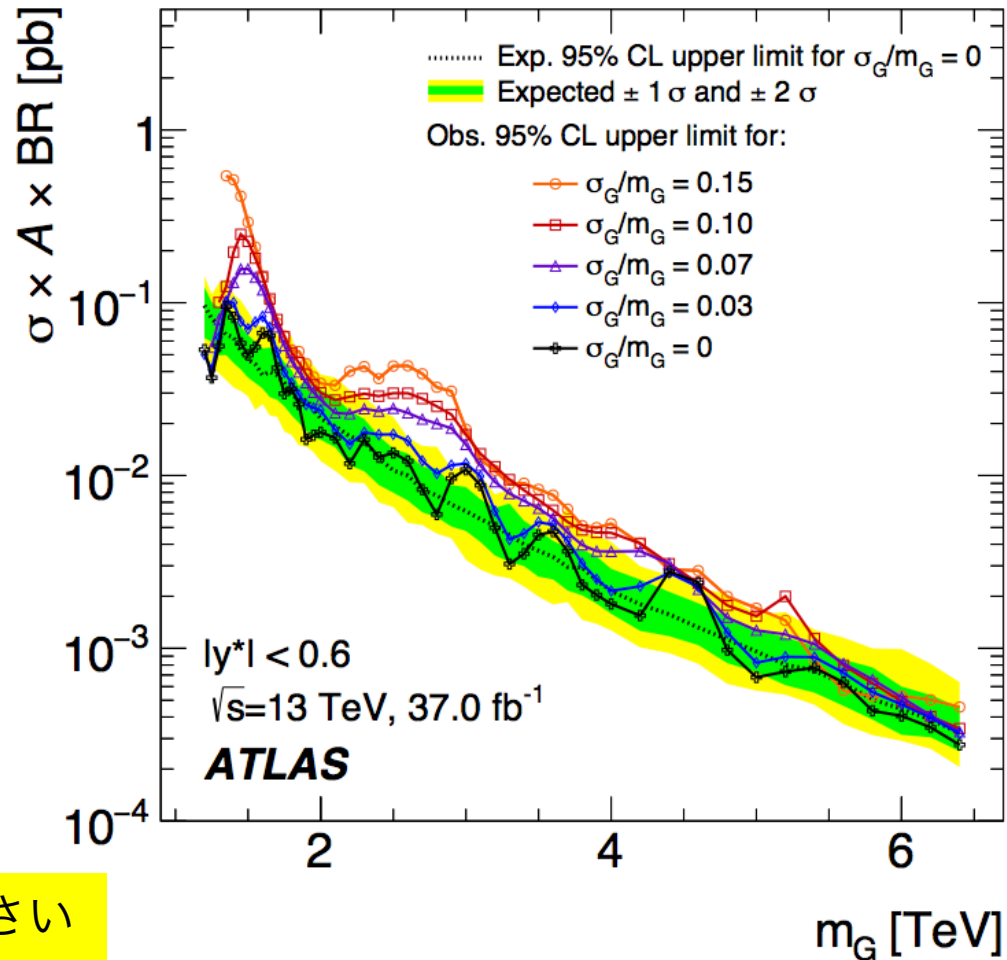


(d) W^*



Model independent な limit

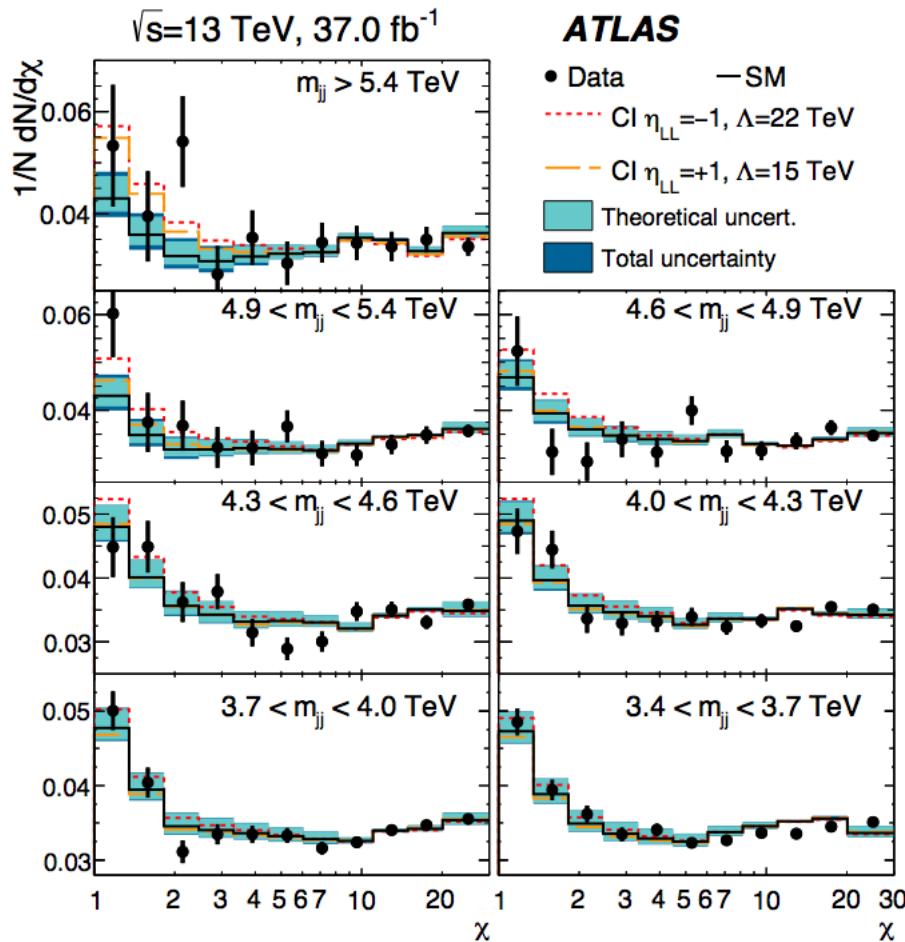
- Gaussian limit
 - いろいろな width で上限値を計算
 - Narrow なケース 3%
 - Intrinsic width がそれよりも大きいケース 7, 10, 15%
 - Fiducial cross-section で上限値を計算
 - 20-50 fb @ 2 TeV
 - 0.2-0.5 fb @ 6 TeV



是非眺めてみて、フィードバックください
(こんな情報が欲しい etc)

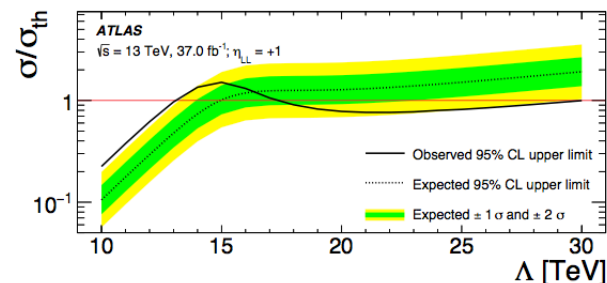
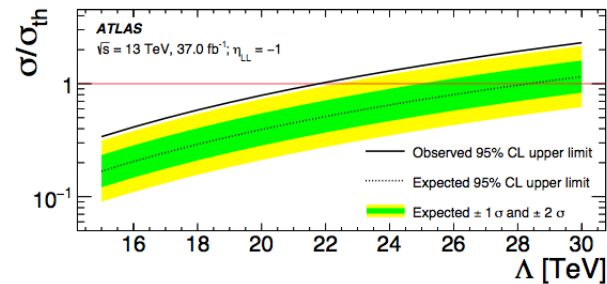
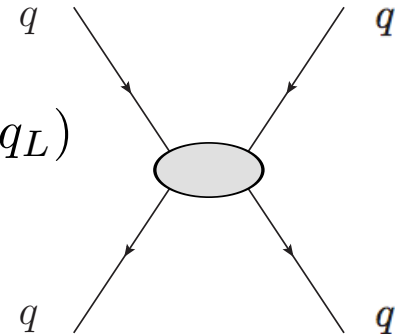
2-jet 角度解析

- “非共鳴” 信号に対する探索 $\chi = e^{2|y^*|} \sim \frac{1 + \cos \theta^*}{1 - \cos \theta^*}$,



実効的な振幅を試験

$$\frac{g^2}{\Lambda^2} \eta_{LL} (\bar{q}_L \gamma_\mu q_L) (\bar{q}_L \gamma_\mu q_L)$$

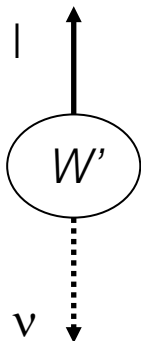


SM の dijet の shape は、
LO (pythia) with “NLO (NLOJET++) correction”

$W' \rightarrow l\nu$ ($l=e, \mu$) 共鳴探索

- 荷電レプトン+ ν 終状態の共鳴

$$m_T = \sqrt{2p_T E_T^{\text{miss}} (1 - \cos \phi_{l\nu})}$$



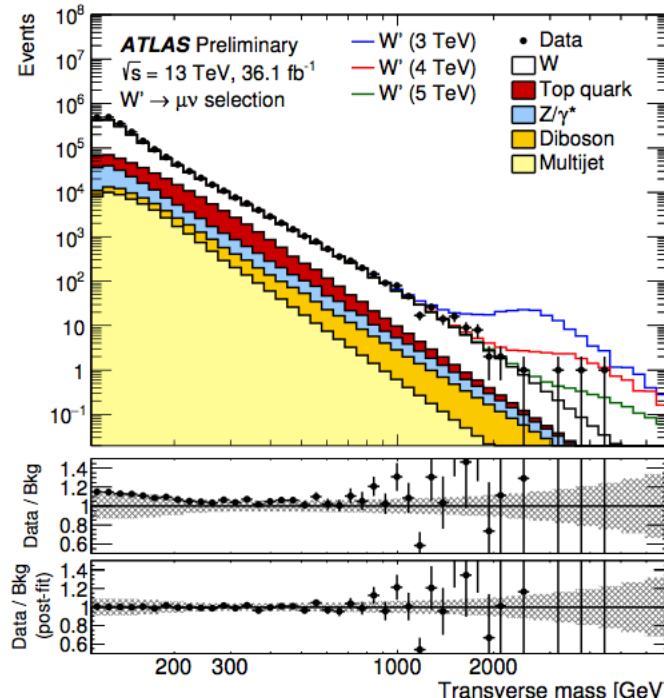
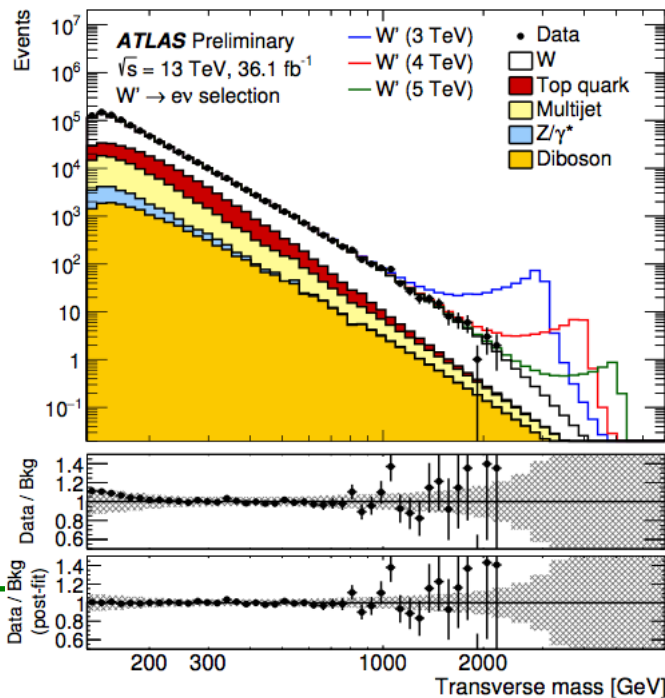
シングル電子トリガー
(medium 60GeV, loose 140GeV)
 $p_T > 65$ GeV
 $|\eta| < 2.47$, veto transition region
Tight ID, isolation
MET > 65 GeV

81% for 2 TeV
77% for 4 TeV

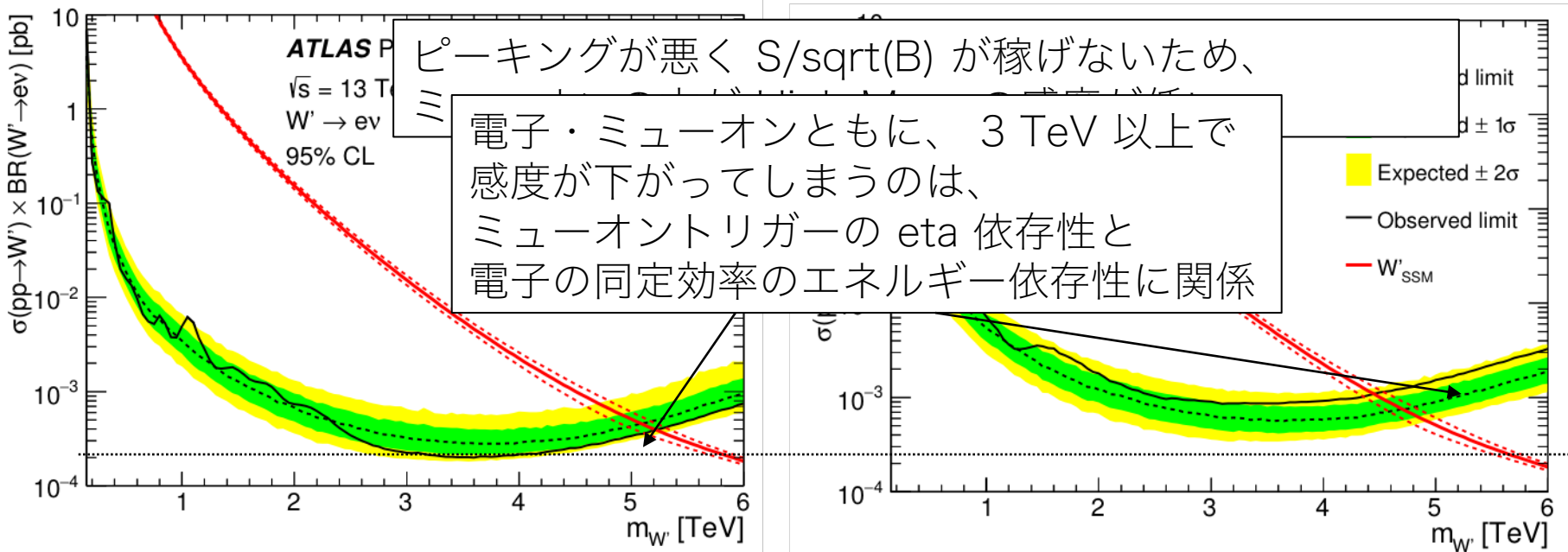
シングルミュオン粒子トリガー (μ 50 GeV)
 $p_T > 55$ GeV, $|\eta| < 2.4$, $d_0, z_0 \sin \theta$
Combined muon, Isolation カット
それぞれの検出層に 3 ヒット
Veto muons in $1.01 < |\eta| < 1.10$
MET > 55 GeV

50% for 2 TeV
46% for 4 TeV

ATLAS-CONF-2017-016



$W' \rightarrow l\nu$ ($l=e, \mu$) 共鳴探索



W' 質量を仮定した際の Sequential Standard Model の棄却 (95% CL)
 電子チャンネル : $m_{W'} = 5.2$ TeV (5.1 TeV @ 13.6/fb)
 ミュオンチャンネル : $m_{W'} = 4.7$ TeV (4.5 TeV expected)
 Combined results : $m_{W'} = 5.2$ TeV (5.1 TeV expected)

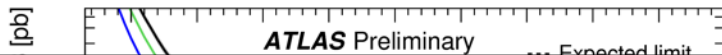
Z' → ll 共鳴探索 (ATLAS)

Events

Model	Width [%]	θ_{E_6} [Rad]	Lower limits on $m_{Z'}$ [TeV]					
			ee		$\mu\mu$		ll	
			Obs	Exp	Obs	Exp	Obs	Exp
Z'_{SSM}	3.0	-	3.85	3.86	3.49	3.53	4.05	4.06
Z'_χ	1.2	0.50	3.48	3.49	3.18	3.19	3.66	3.67
Z'_S	1.2	0.63 π	3.43	3.44	3.14	3.14	3.62	3.61
Z'_I	1.1	0.71 π	3.37	3.37	3.08	3.08	3.55	3.55
Z'_η	0.6	0.21 π	3.25	3.25	2.96	2.94	3.43	3.42
Z'_N	0.6	-0.08 π	3.23	3.23	2.95	2.94	3.41	3.41
Z'_ψ	0.5	0 π	3.18	3.18	2.90	2.88	3.36	3.35

GUT & E_6 symmetry breaking をするために出てくる二個の $U(1)$ 対称性による Z'

Data / Bkg



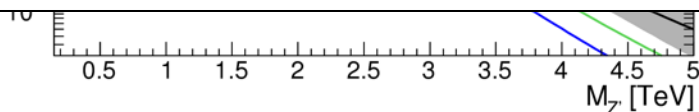
電子チャンネル選別：
 トリガー 2 電子 (15 GeV)
 2 電子 $p_T > 30$ GeV, $|\eta| < 2.47$
 Isolation カット

効率 73% (3 TeV Z')



muon チャンネル選別：
 トリガー 1 ミューオン 26 GeV / 50 GeV
 2 ミューオン $p_T > 30$ GeV, $|\eta| < 2.5$,
 Isolation カット
 それぞれの検出層に 3 ヒット
 Veto muons in $1.01 < |\eta| < 1.10$

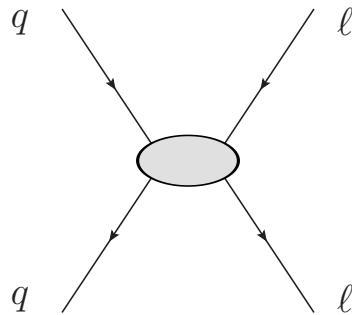
効率 44% (3 TeV Z')



EFT アプローチ

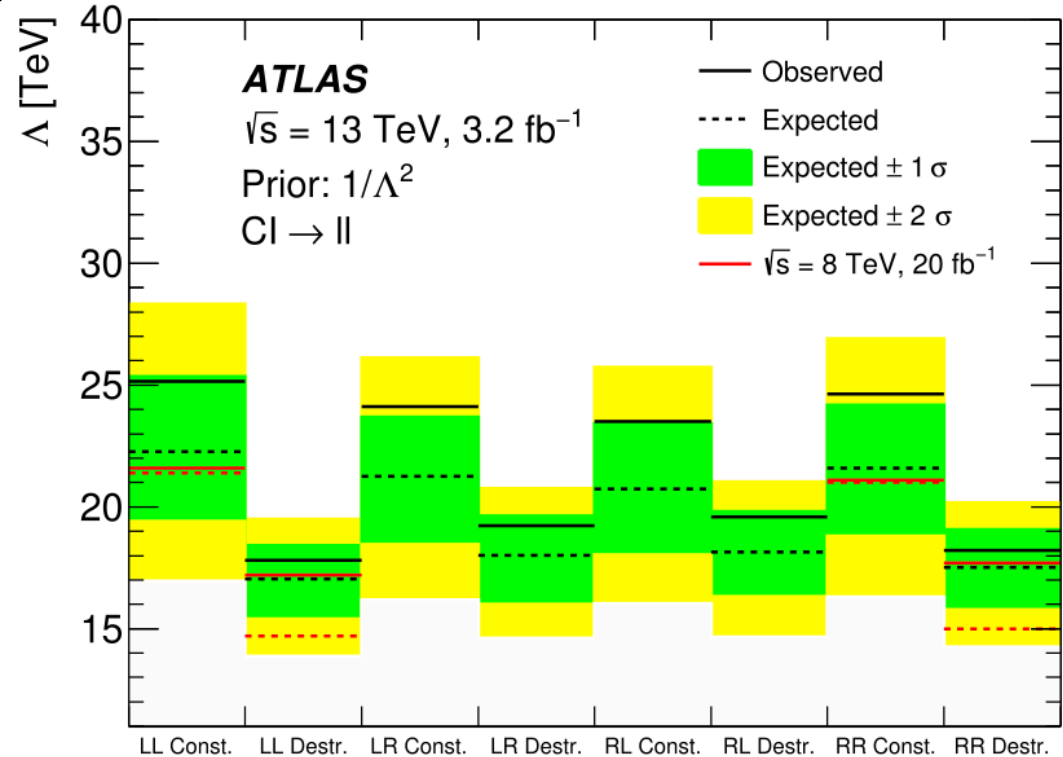
- 考える実効的な振幅

$$\frac{g^2}{\Lambda^2} \eta_{LL} (\bar{q}_L \gamma_\mu q_L) (\bar{\ell}_L \gamma_\mu \ell_L)$$



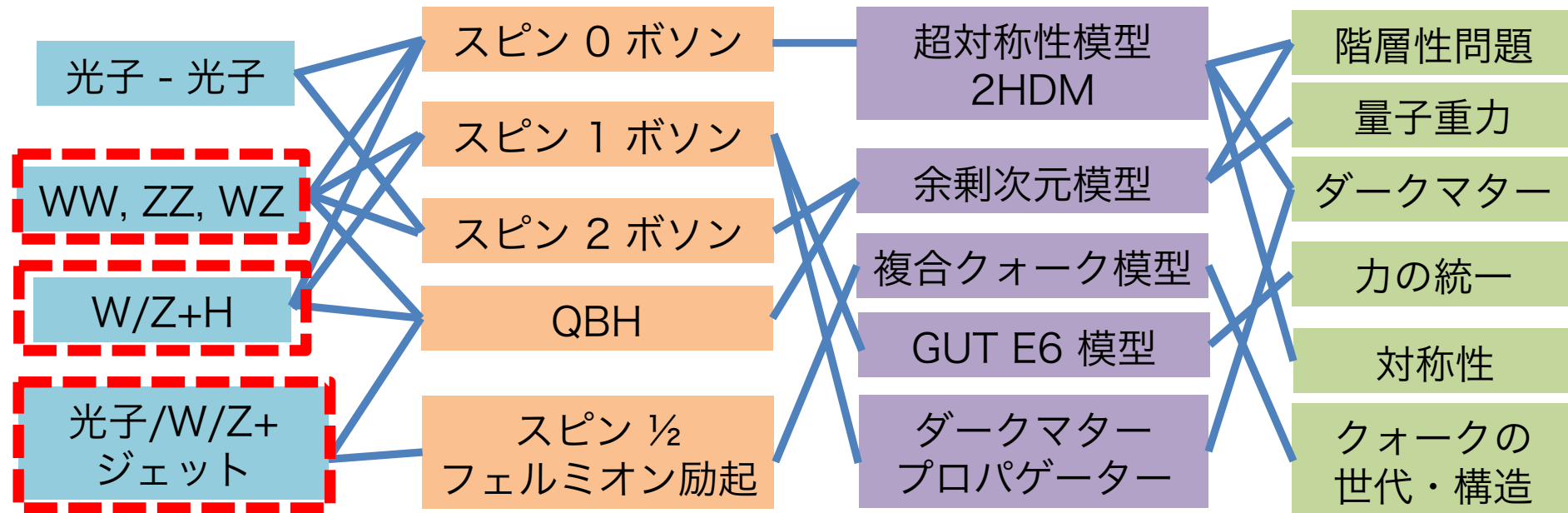
- 結合常数 : Unity
- SM との結合
 - +1, -1 をテスト
- Cut off スケール (Λ) を試験
 - ~25 TeV (constructive)
 - ~17-20 TeV (destructive)

同様に RL, LR, RR の組み合わせ



2 ボソン終状態

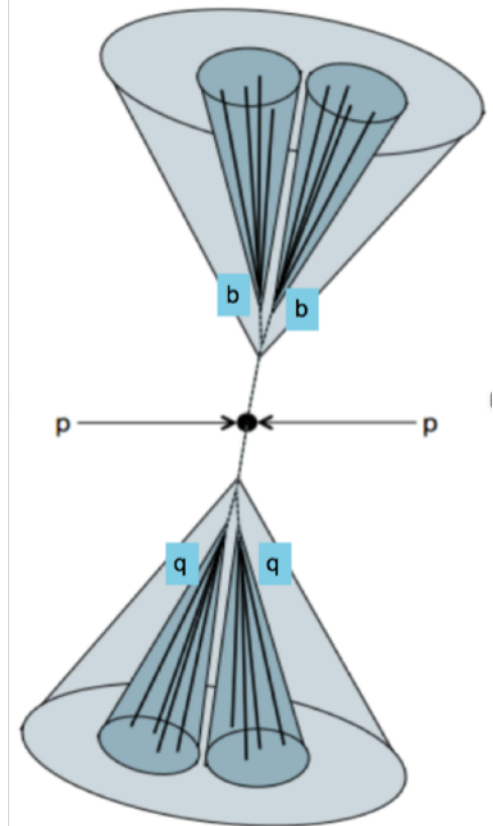
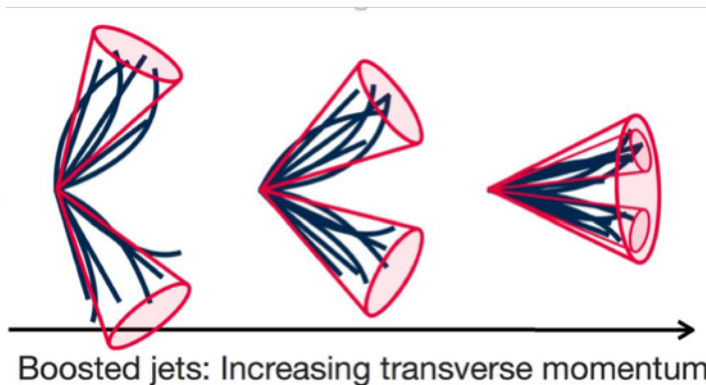
- 「新粒子と新物理」に対する動機が豊富



- 精密測定としても重要
 - 3点結合点、4点結合点、 $W_L W_L$ 散乱
 - 真に H125 がスカラーか試験、次のエネルギースケールを見定める
 - 精密測定から“新物理スケール”の決定

VH (full hadronic)

- WH, ZH 終状態でアクセスできる新粒子
 - CP-odd higgs in 2HDM
 - (一般的に) Z' and W' mixing to SM Z and W
- Full hadronic 終状態 (qq+bb)
 - BF が大きい **が background が多い**
 - “High mass 探索向け” の終状態
 - 1 TeV より大きな領域にフォーカス
- “2 ジェット終状態” としての探索
 - Large-R jet をいかに正しく扱うかが鍵



VH (full hadronic)

- VH 探索としての 2-jet 共鳴探索

- Trigger : 420 GeV R=1.0
- Jet kinematics :
 - $p_{T1} > 450$ GeV, $p_{T2} > 250$ GeV
 - $|\eta| < 2.0$
 - $|\Delta y| < 1.6$

- “でかい jet” を正しく扱うために

- Trimming (wrt R=0.2)
- いわゆる “sub-structure” 技術
 - Jet 質量の再構成

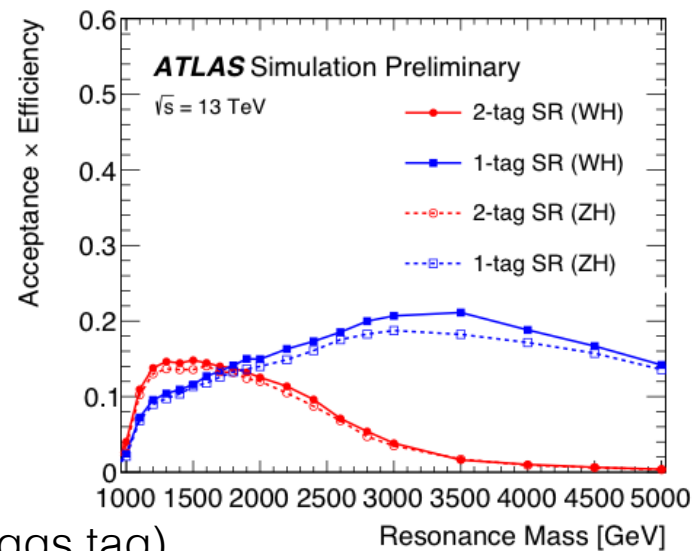
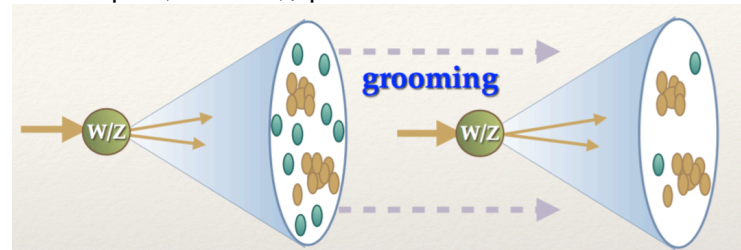
$$m_J \equiv w_{\text{calo}} \times m_J^{\text{calo}} + w_{\text{track}} \times \left(m_J^{\text{track}} \frac{p_T^{\text{calo}}}{p_T^{\text{track}}} \right),$$

- Energy correlation (W/Z-tag)
- b-tagging of sub-jet (1-btag, 2-btag) (Higgs tag)

- Higgs ジェット候補と V ジェット候補を決めて共鳴探索

- 質量の順に H-tag, V-tag をすると 99% の確率で正しい組み合わせ

Trimming (soft な輻射 + pileup)
 $p_T(R=0.2)/p_T < 0.05$ を落とす



VH (full hadronic)

H-jet 中の b-tag 数で 2 つの信号領域 (V-jet の質量でさらに 2 種類)

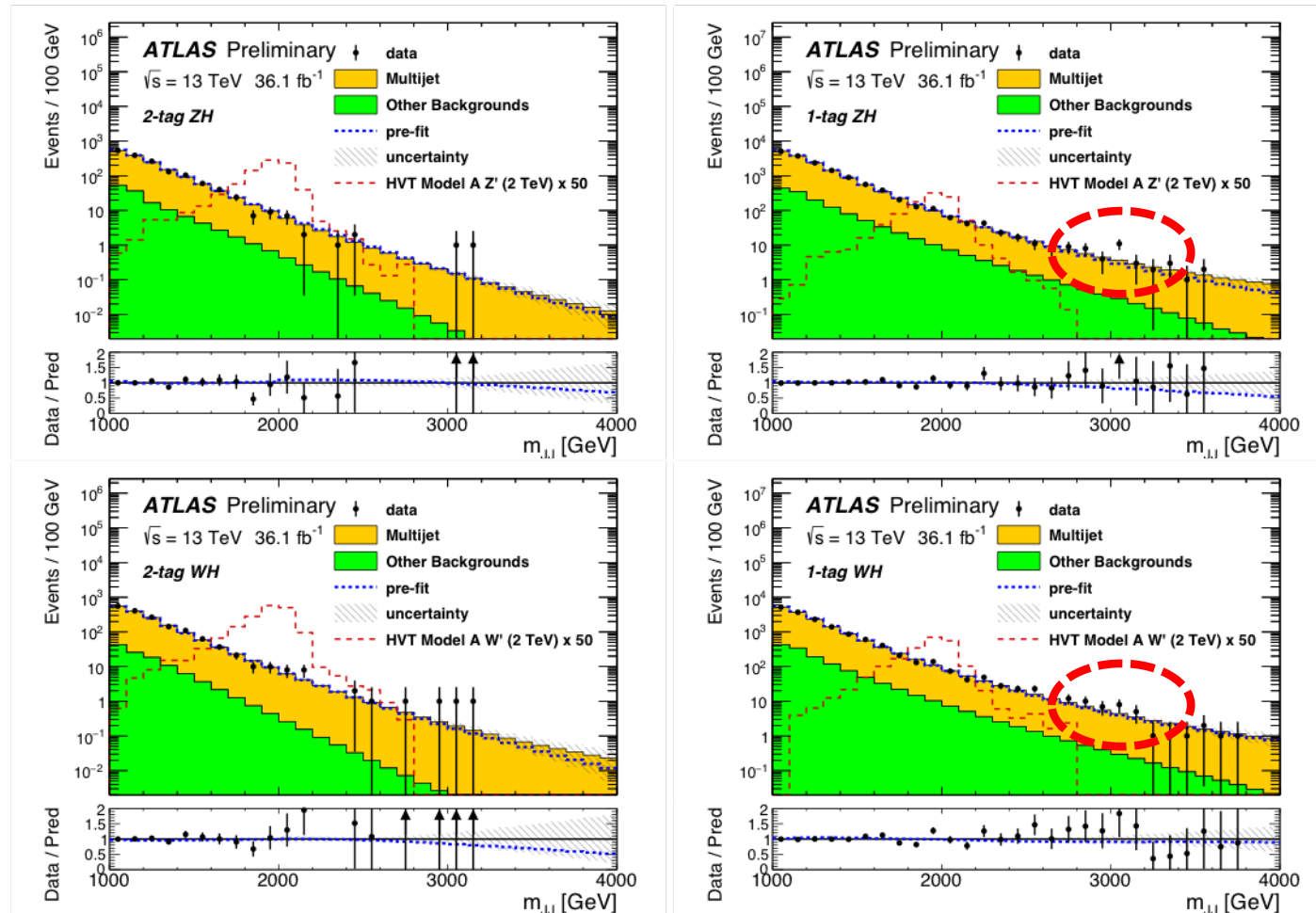
背景事象の組成

- Multi-jet (90%)

H mass sideband +
0 tag region で制約
mass shape 及び、
normalization

- ttbar (10%)
- V+jet (<1%)

MC base で決定



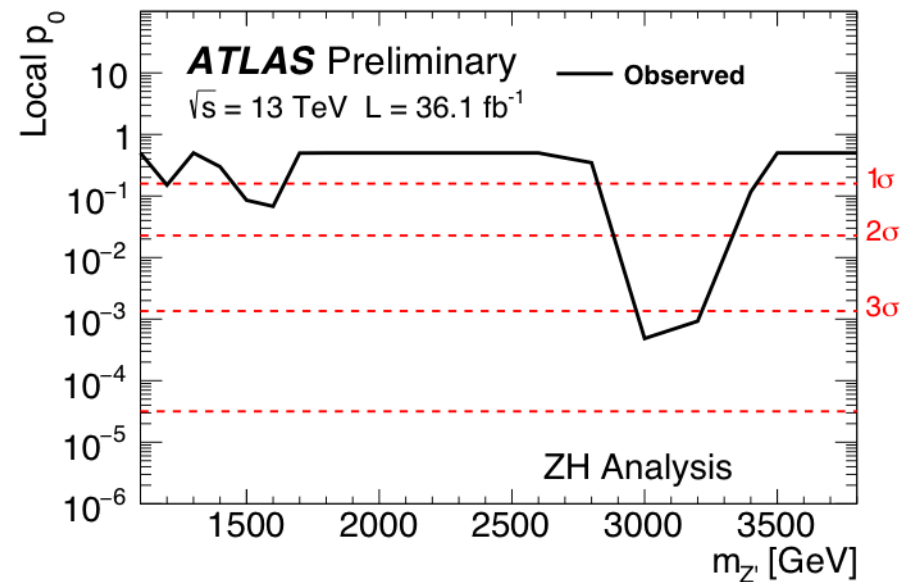
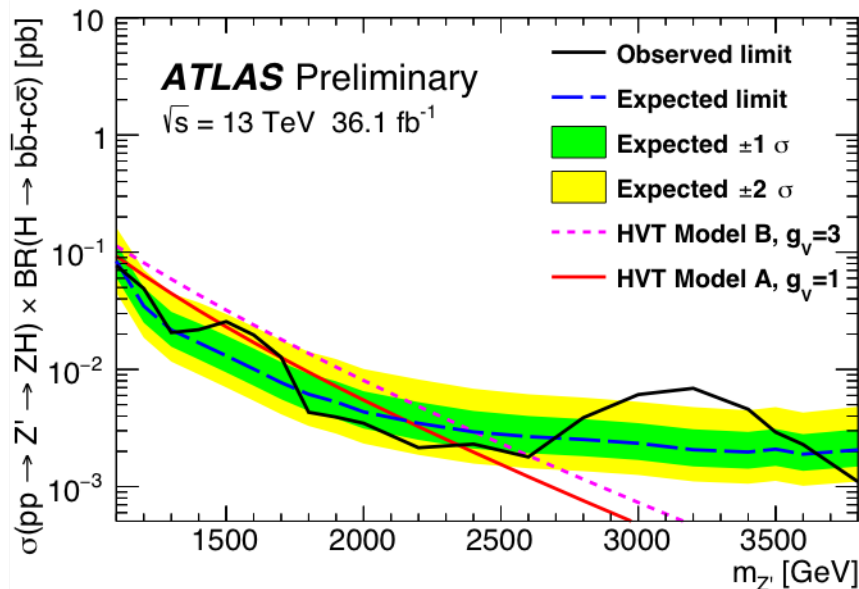
Z と W のカテゴリ分けは統計的に独立でないので注意17/31

VH (full hadronic)

- Limit setting は, Heavy Vector Triplet の framework に則って手続き

V の運動項に SU(2) ゲージ対称性
 Higgs 場の共変微分に V を新しい coupling で導入
 Fermion 場の共変微分に V を新しい coupling で導入 (Type-A)
 V と W の混合により physical な共鳴を形成

- Excess significance 解析 (p-value) 3.3σ @ 3 TeV
 - いわゆる “CLs method” で B-only hypothesis の妥当性を評価



一方 CMS では

- 似たように 2-jet システムでの探索解析

CMS-PAS-B2G-17-002

- Trigger :

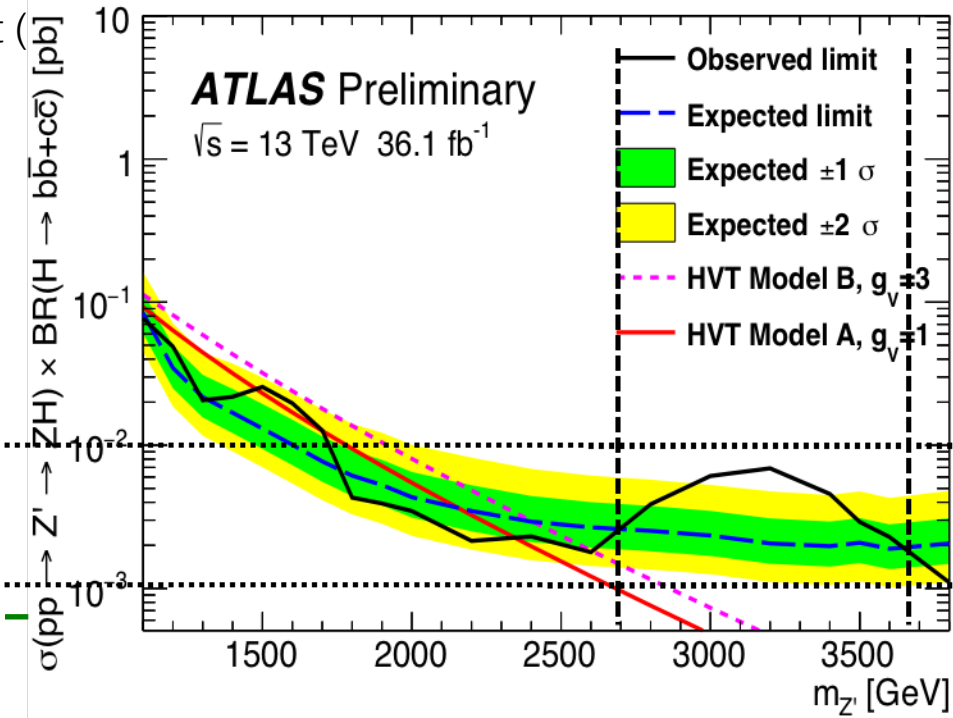
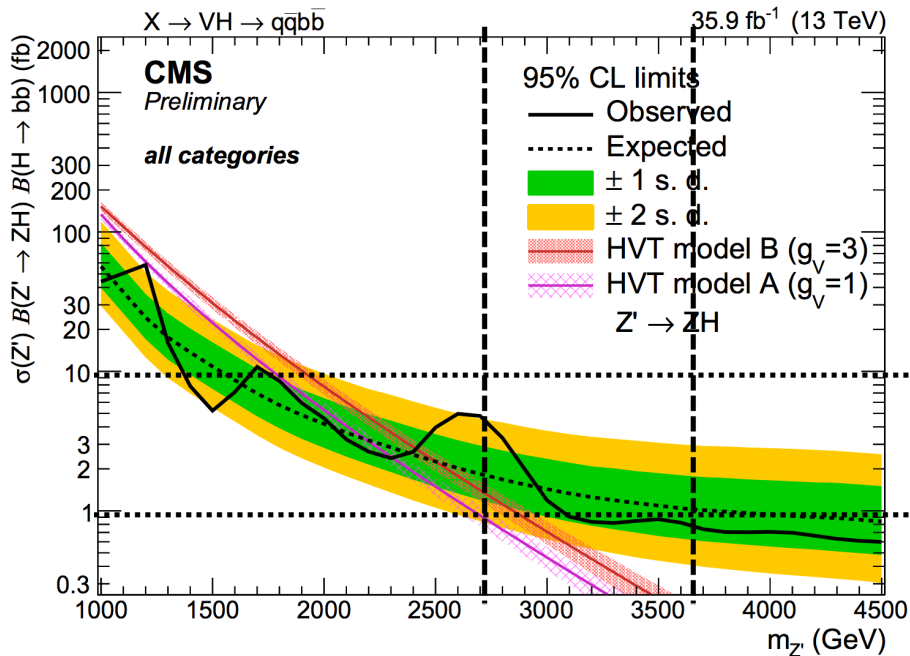
- HT (800-900 GeV) or HT(650)+M_j (950)+ $\Delta\eta_{jj}<1.5$
- Single jet trigger (450 GeV)
- Single jet (360) + MJ (30) or HT(700) + MJ (50)

- Offline

- 2 Jet (p_T>200 GeV, $|\eta|<2.5$, $|\Delta\eta|<1.3$), MJ~ higgs mass
- MJJ > 985 GeV

- 8 Categories

- V-tag (W, Z), substructure in V-jet (



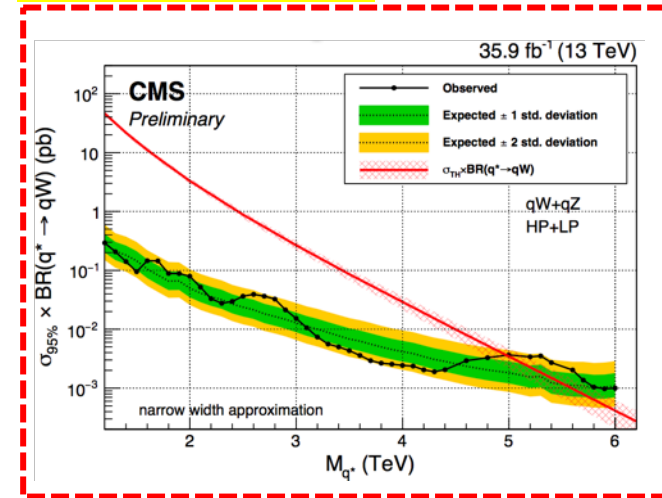
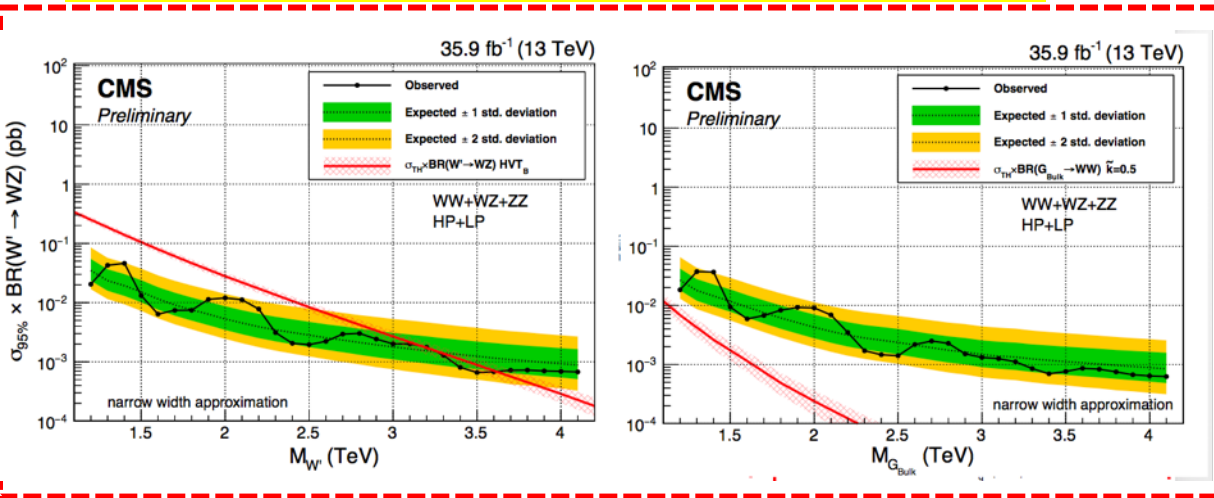
Vq + VV (CMS) 探索

- “VV, V+jet” も 2-jet 終状態として探索
 - Trigger :
 - HT (800-900 GeV)
 - HT(650-700)+jet pT (360) & MJ(30-50)
 - Offline :
 - 2-jet (pT>200 GeV, $|\Delta\eta_{jj}|<1.4$, $m_{jj}>1058$ GeV)
 - Categorization
 - 1-V-tag or 2-V-tag, V-tag purity (N-subjettiness)

CMS-PAS-B2G-17-001

VV 信号領域 (HVT (spin1) と Graviton (spin2))

Vj 信号領域 (q^*)

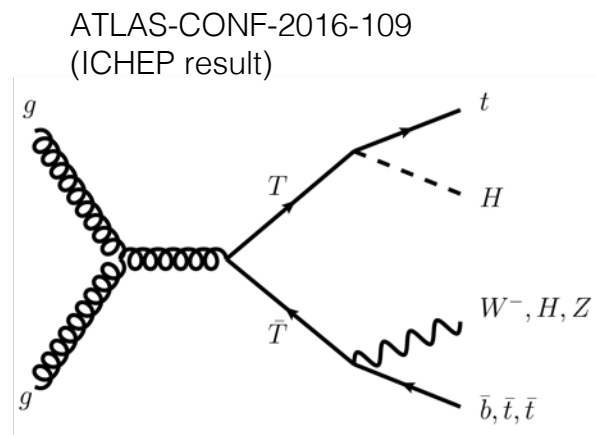
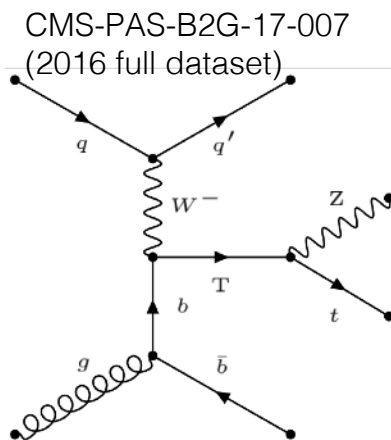
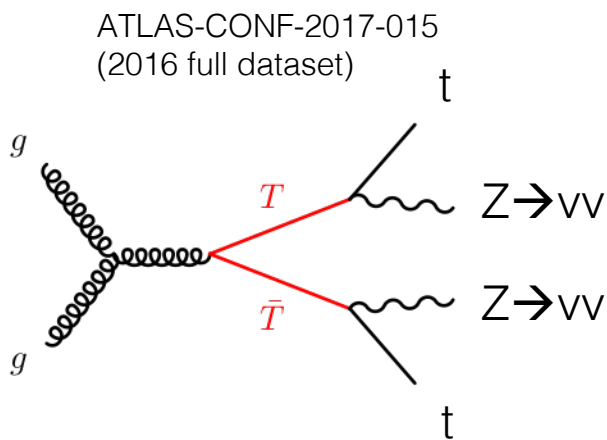


トップクォークに注目した探索

- トップパートナーの有力候補
 - Scalar top (SUSY の枠組みで研究中 - 本トークでは割愛)
 - Vector-like Top-quark
- Vector-Like Top-quark (VLT “T”) について
 - 「カイラリティ左・右巻きが弱アイソスピンで同じ構造を持つ」「全く別種のカラー 3 重項 (quark-like) な新フェルミオン」
 - 弱アイソスピンの構造は未定義 (一重項、二重項、三重項 を考える)
 - 標準模型クォークと mixing が原理的にできる
 - トップとは mixing があることにする。この意味で Vector Like “Top”
 - 最近流行り
 - 単純な重い 4 世代目への拡張は Higgs 125 GeV 断面積に抵触
 - VLT は gauge invariant な質量を持てるので回避可能
 - “Little Higgs” 等、Naturalness に刺激されたヒッグスを composite な粒子として記述するモデルとの相性も良い

探索戦略

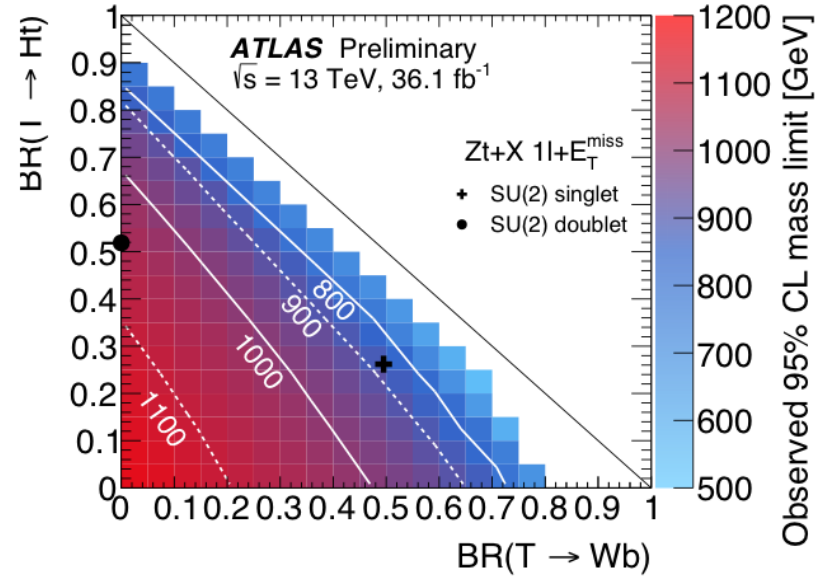
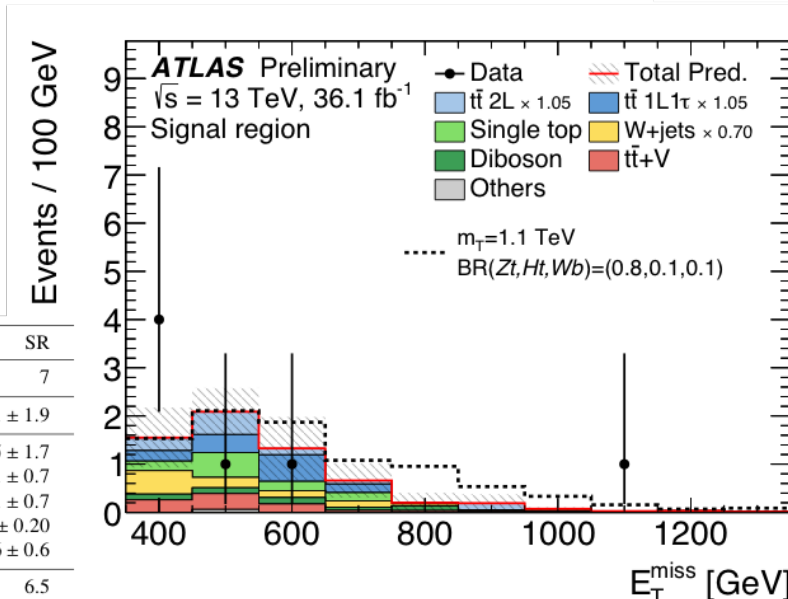
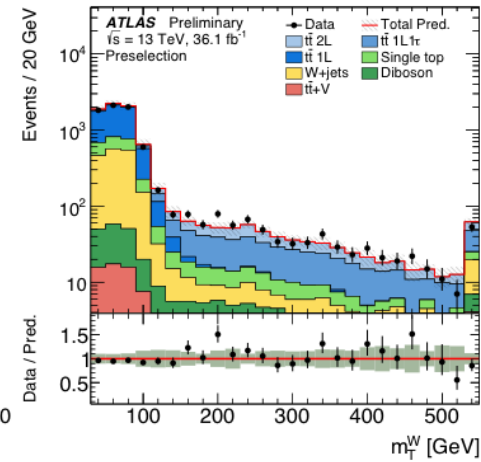
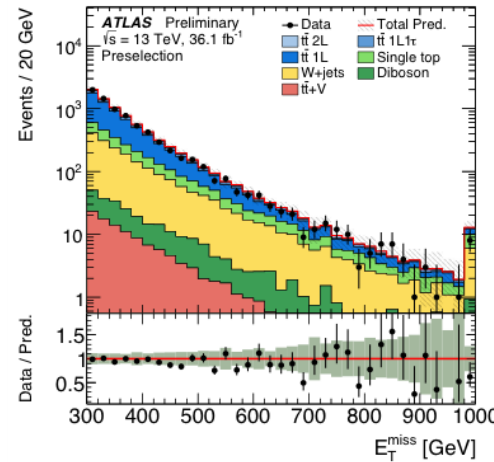
- 生成過程
 - 対生成 (TT) or 単一生成 (t-T 混合がでかいシナリオで大事)
- 崩壊過程
 - $T \rightarrow tZ$, $T \rightarrow tH$, $T \rightarrow Wb$
 - とりあえず未知数が少なく済む過程に注目



TT 対生成 + T→tZ(→vv) 探索

- tt 対生成の large missing ET tail に注目した探索

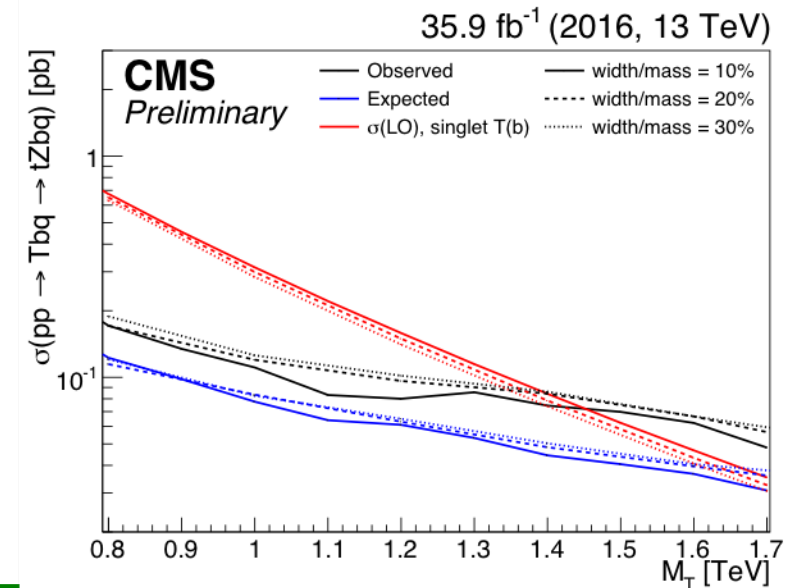
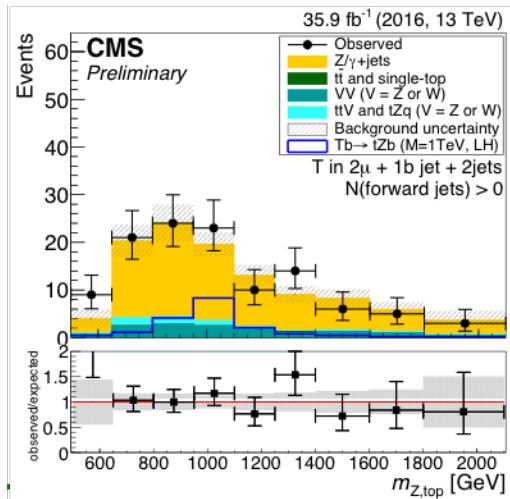
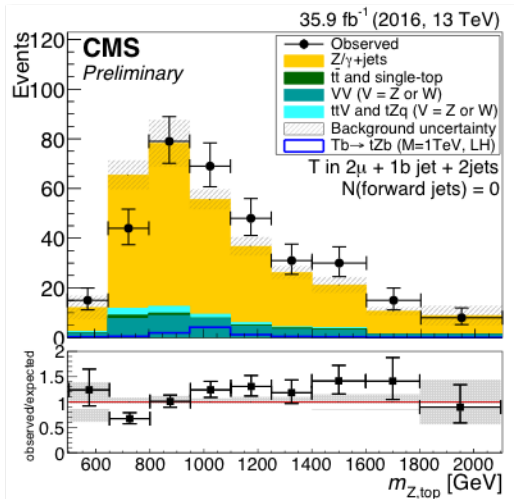
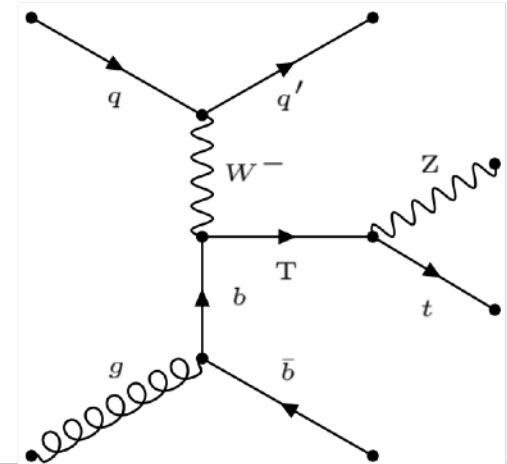
- Missing ET trigger (70-110 GeV)
- Offline cuts
 - large MET, 1 lepton, mT(W)/mT2, b-tag, 4 jets (inclusively 2 large R jets with large PT MJ)



Channel	SR
Observed events	7
Fitted bkg events	6.1 ± 1.9
Fitted $t\bar{t}$ events	2.5 ± 1.7
Fitted W + jets events	1.1 ± 0.7
Fitted singletop events	1.1 ± 0.7
Fitted $t\bar{t} + V$ events	0.91 ± 0.20
Fitted diboson events	0.6 ± 0.6
MC exp. SM events	6.5

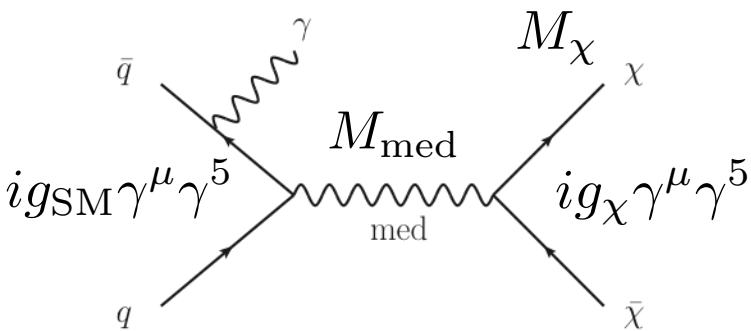
单一 T 生成 + $T \rightarrow tZ (\rightarrow \ell\ell)$ 探索

- “Z($\ell\ell$)+boosted top(3q)” 探索
 - single lepton trigger
 - isolated muon (24 GeV)
 - single electron (115 GeV)
 - Z mass
 - Jet requirement (T-jet, W-jet, resolved)
 - b-jet
- Categorization with forward jet



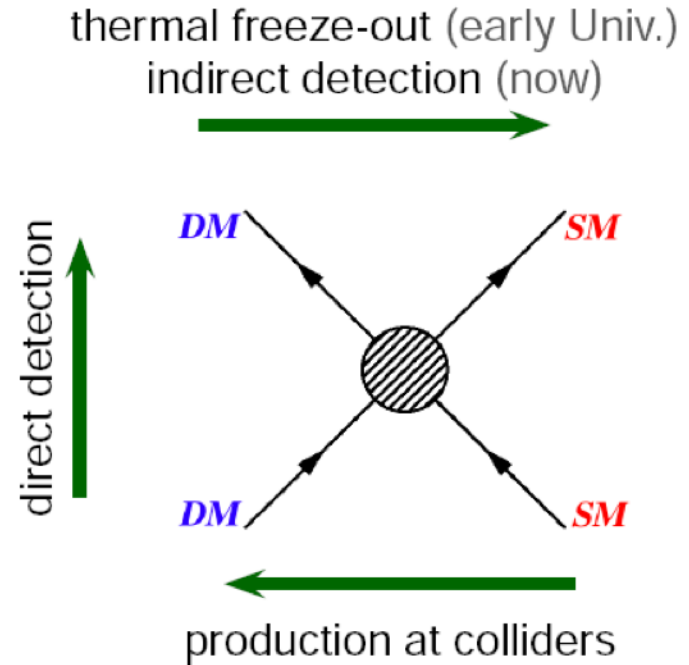
“maverick” WIMP 探索 @ LHC

- WIMP search @ LHC
 - Model dependent な探索
 - Simplified model (not EFT)








Axial vector /
vector 型を仮定
して試験

note : Axial vector = SD
Vector = SI

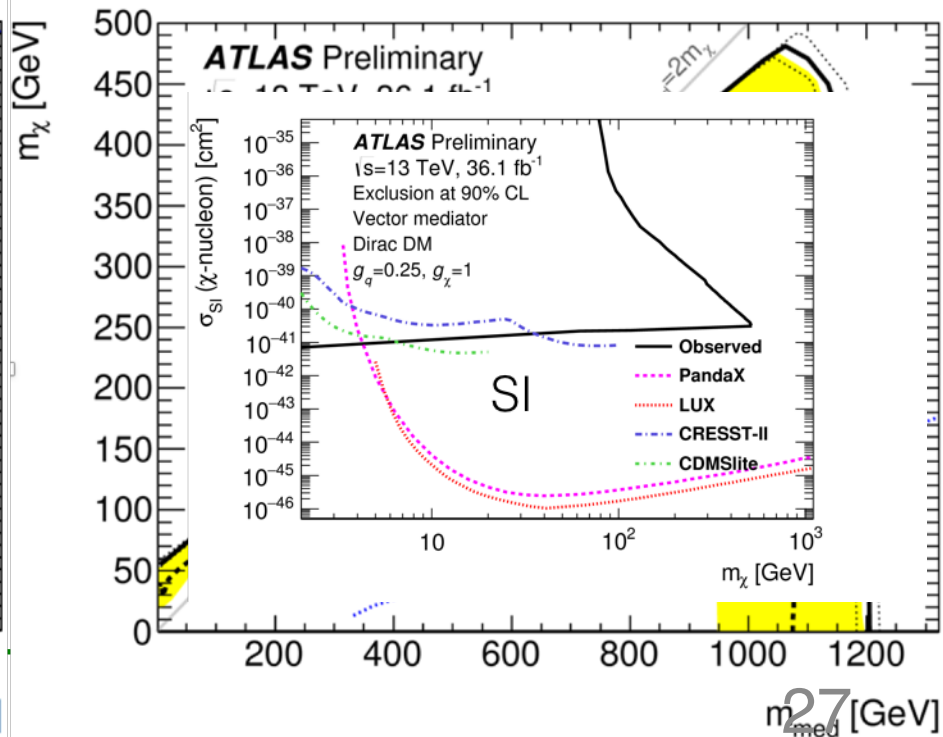
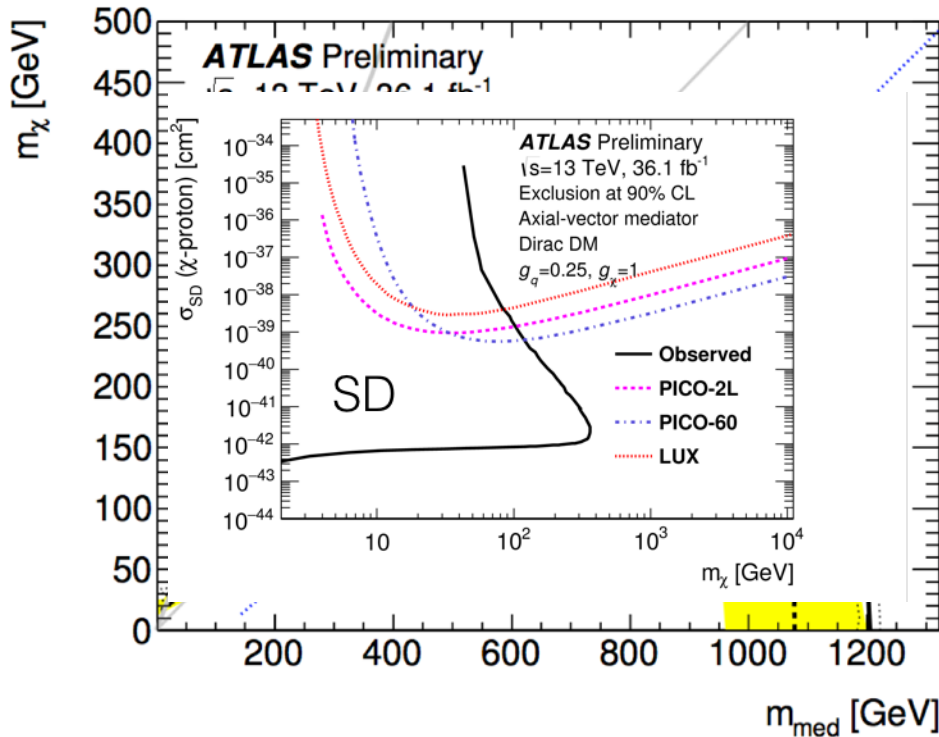
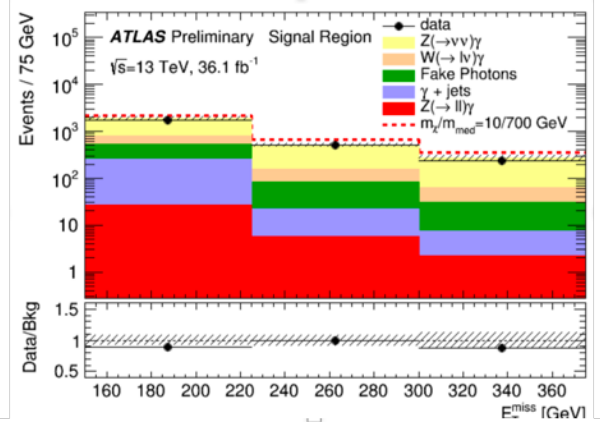


- Trigger の関係で随伴する粒子を要請
 - mono-photon, jet (それなりに model independent)
 - mono-higgs, top etc (結構 model dependent)

		ATLAS			CMS		
		Ref.	Data	L [fb ⁻¹]	Ref.	Data	L[fb ⁻¹]
Mono Jet		PRD 94 (2016) 032005	2015	3.2	1703.01651 (sub, JHEP)	2016	12.9
Mono V		Phys. Lett. B 763 (2016) 251	2015	3.2			
Mono-Photon		 EXOT-2016-32	2015+2016	36	EXO-16-039	2016	12.9
Mono-Higgs	bb	Phys. Lett. B 765 (2017) 11	2015	3.2	 COMBO: 1703.05236 (sub JHEP)	2015	2.3
	gg	 ATLAS-CONF-2017-024	2015+2016	36.1			
	ZZ	ATLAS-CONF-2015-059	2015	3.2			
Mono Z		ATLAS-CONF-2016-056	2015+2016	13.3	EXO-16-038	2016	12.9
Mono t					EXO-16-040	2016	12.9
Mono tt	had:	ATLAS-CONF-2016-077	2015+2016	13.3	EXO-16-005	2015	2.3
	semil:	ATLAS-CONF-2016-050	2015+2016	13.3			
	lep:	ATLAS-CONF-2016-076	2015+2016	13.3			
Mono bb		ATLAS-CONF-2016-086	2015+2016	13.3	B2G-15-007	2015	2.2
DiJet / Reinterp.		ATLAS-CONF-2016-069  EXOT-2016-21	2015+2016	15.7	 EXO-16-056	2016	36

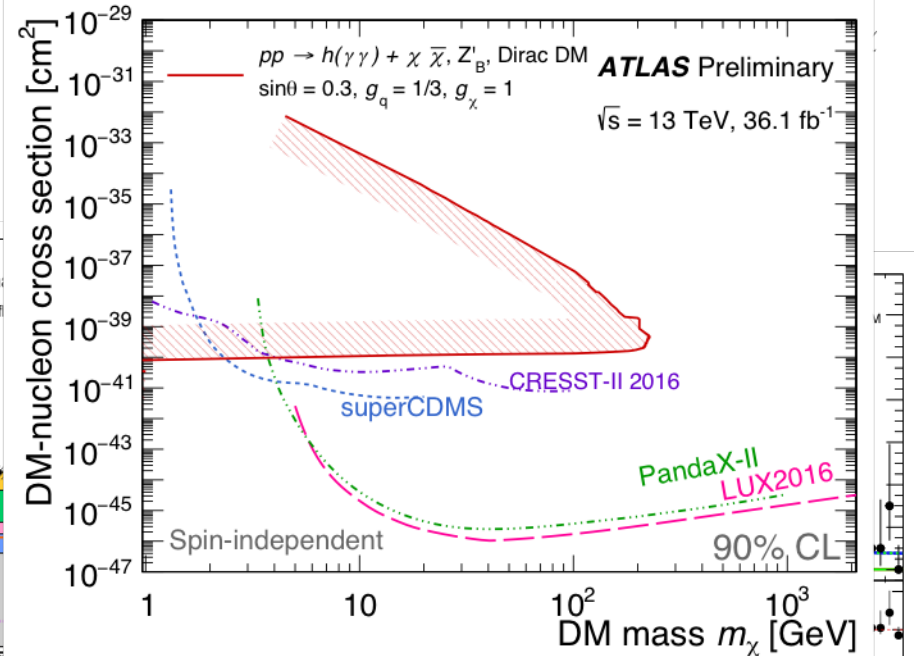
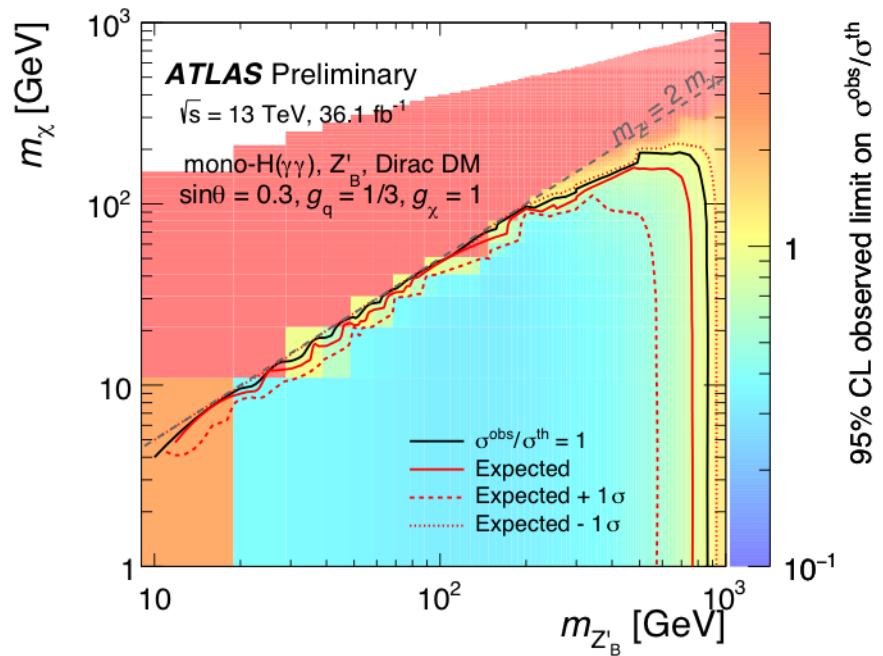
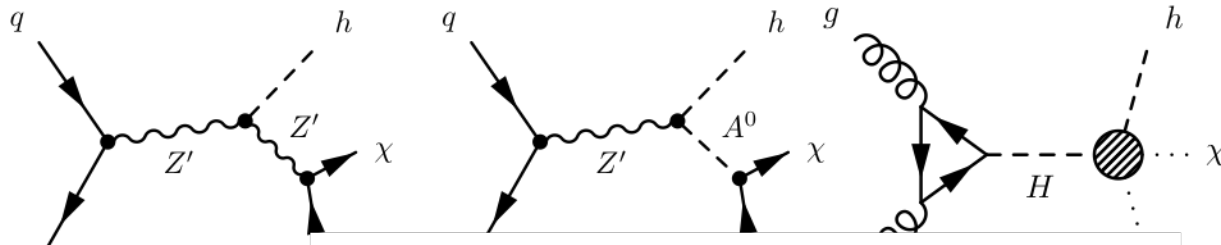
mono photon

- 光子事象の large missing ET tail に注目
 - Single photon trigger (140 GeV)
 - $p_T > 150$ GeV
 - $MET > 150$ GeV, $MET/\text{sumET} > 8.5$ GeV^{1/2}
- Simplified model に則って制限
 - 直接探索 (核子 - WIMP) との比較

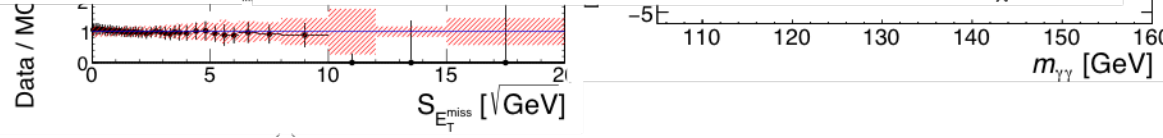


mono Higgs

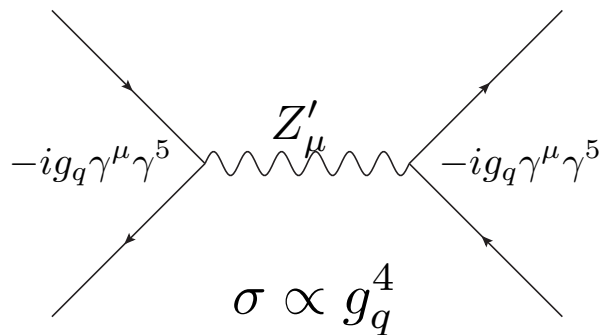
- ターゲット：
 - $Z'Z'h, Z' \rightarrow A^0h$
 - NP の構造の理解
- Diphoton + MET 探索



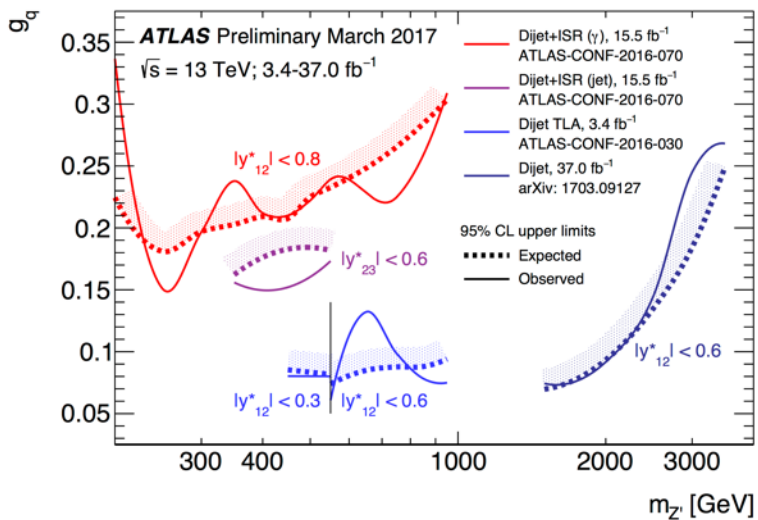
Category	Selection
Mono-Hi	$S_{E_T^{\text{miss}}} > 4 \sqrt{\text{GeV}}, p_T^{\text{hard}} > 40 \text{ GeV}, z_{PV}^{\text{hard}} - z_{PV}^{\gamma\gamma} > 0.1 \text{ mm}$
High- E_T^{mi}	
Intermedi	$p_T^{\gamma\gamma} > 15 \text{ GeV}$
Different-Vertex	
Rest	



2 jet 共鳴探索

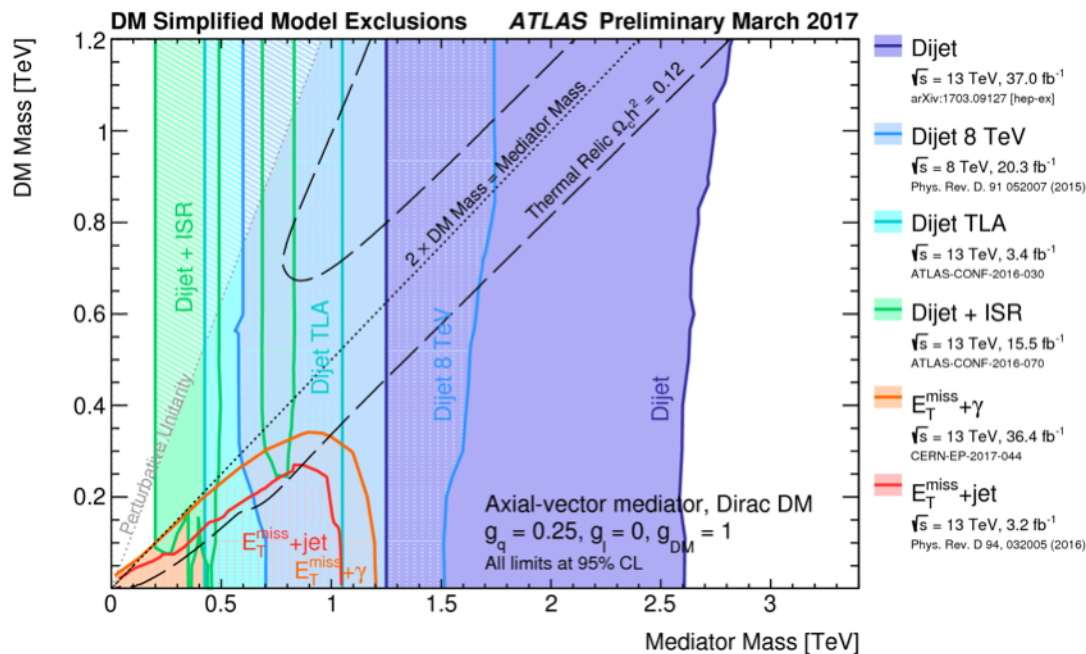


断面積の上限を g_q の上限に焼き直し



13 TeV
TLA dijet 探索

13 TeV High mass
dijet 探索



13 TeV
dijet + ISR 探索

8 TeV High mass
dijet 探索

$g_q=0.25$ の棄却領域

まとめ

- 多くの終状態で探索研究を鋭意継続中
- より詳しくは web page で：
 - “ATLAS public results” と検索
 - <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
 - <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/Winter201713TeV> (特に Moriond 2017 で発表した新結果のまとめ)
 - “CMS public results” と検索
 - <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>

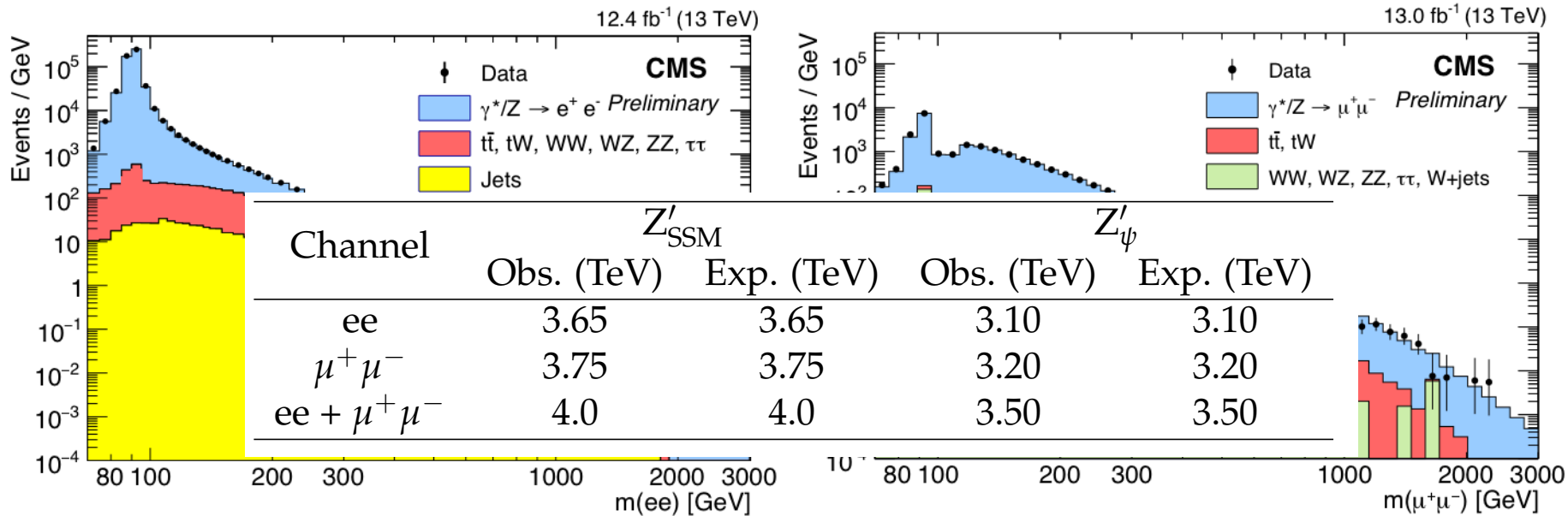
まとめ

- LHC Run2 ~120/fb で何ができるか？
 - 継続的な “high mass” 探索
 - 2-jet, W', Z', 2-photon, photon+jet etc
 - 複雑な & 難しいイベントトポロジーでの探索
 - ソフトな終状態へのアプローチ
 - 質量縮退
 - 比較的低質量でのハドロニック終状態
 - 長寿命粒子等、標準的な手法では再構成されない終状態
 - Disappearing objects
 - Displaced objects
 - (それなりに) モデル specific な探索を展開する必要性



バックアップスライド

Z' → II 共鳴探索 (CMS)



電子チャンネル選別：
 トリガー 2 電子 (33 GeV)
 2 電子 $p_T > 33$ GeV, $|\eta| < 2.5$,
 Isolation カット

効率 ~ 66-69% (1 TeV Z' - トリガー除く)

muon チャンネル選別：
 トリガー 1 ミューオン 50 GeV
 2 ミューオン $p_T > 53$ GeV, $|\eta| < 2.4$,
 Isolation cut
 (radiative muon にたいする special fit)

効率 ~ 90% (1 TeV Z' トリガー除く)

