

Exotic 探索まとめ 1

(光子 & フェルミオンの共鳴探索を中心に)

奥村恭幸

東京大学 ICEPP

標準模型を超えて

- 素粒子標準模型は実験をよく再現する優れた模型
- でも多分、超高エネルギーまで万能な理論ではない
 - 階層性問題 (不自然に弱い重力)
 - ダークマター
 - パラメーター数
 - フェルミオンの世代
 - 力の統一
 - etc..

きっと何かはあるけど、どこになにがあるのかはわからない

100 GeV – 10 TeV 領域を包括的にカバーする戦略で探索

イベントトポロジーベースの戦略

- 二体崩壊過程の共鳴をベースに新物理を探索

- jet – jet (qq, qg, gg)
- jet – γ ($g\gamma$, $q\gamma$)
- γ – γ
- lepton – lepton
- lepton – Missing ET
- WW, WZ, ZZ, hh

広い物理モデル
様々な新粒子をカバーする探索

このトークで
カバーする内容

次の野辺さんのトークで、W, Z, H 共鳴、
Boosted object を含む共鳴、
ダークマター対生成探索がカバーされます。

トークの内容

- 光子検出性能についての議論
- 2 光子共鳴探索
- 2 ジェット共鳴探索
- 荷電レプトン共鳴探索
- 第三世代に注目した共鳴探索

ATLAS 実験の公式結果一覧

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>

CMS 実験の公式結果一覧

<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>

光子検出性能 についてのまとめ

光子の再構成 (ATLAS)

- 電磁カロリメータによるエネルギー再構成
 - 複数のカロリメータ層の情報を
用いたエネルギー測定
 - カロリメータ前のエネルギー損失も補正

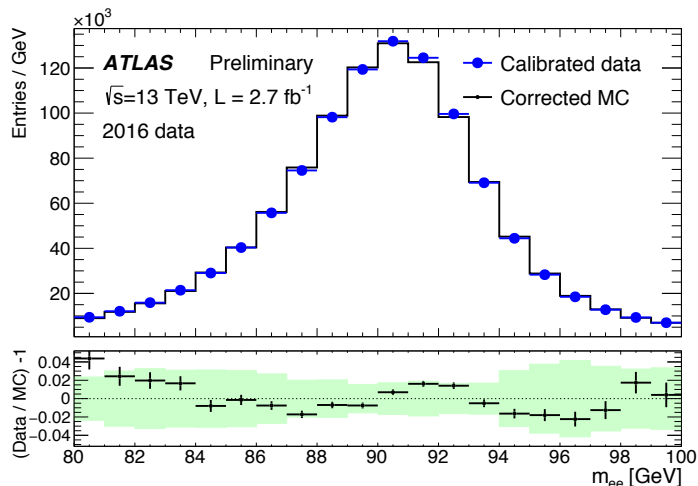
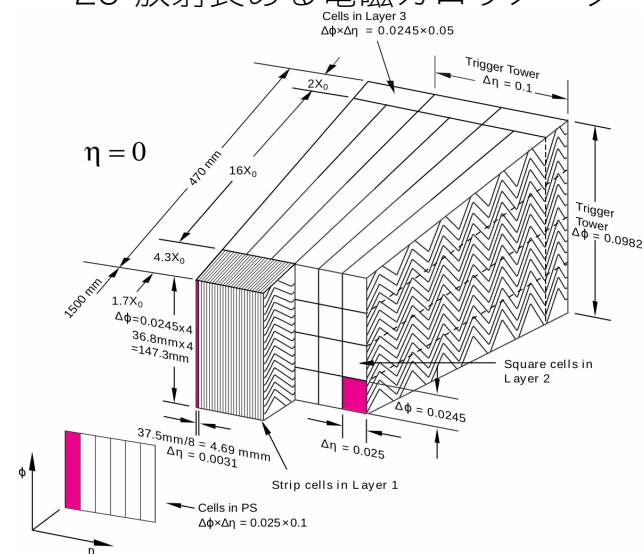
エネルギー分解能

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

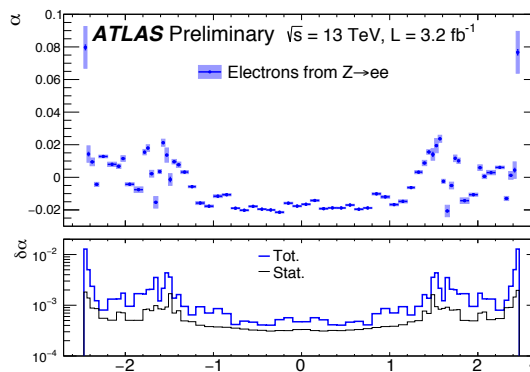
a ~ 10% sqrt(GeV)
 b ~ 250 MeV
 c ~ 0.7%
 (100GeV 以上の光子に対しては
 c の項が主に分解能を決める)

- 2016 年のデータを用いた calibration
 - Z → ee データを用いてエネルギー再構成の性能を実証

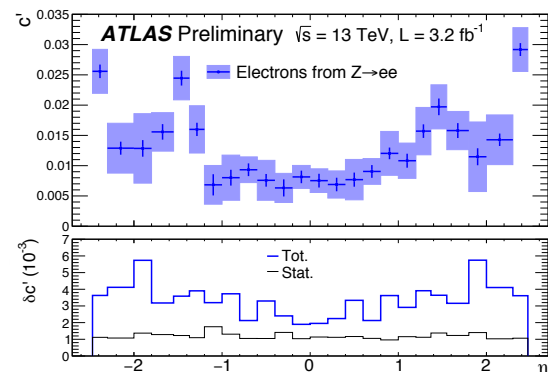
~25 放射長ある電磁カロリメータ



スケール補正

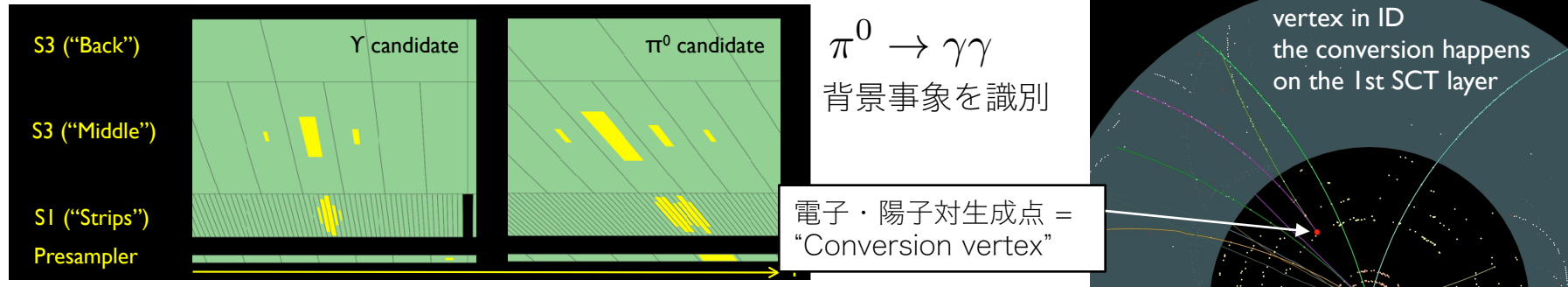


MC の分解能モデル補正

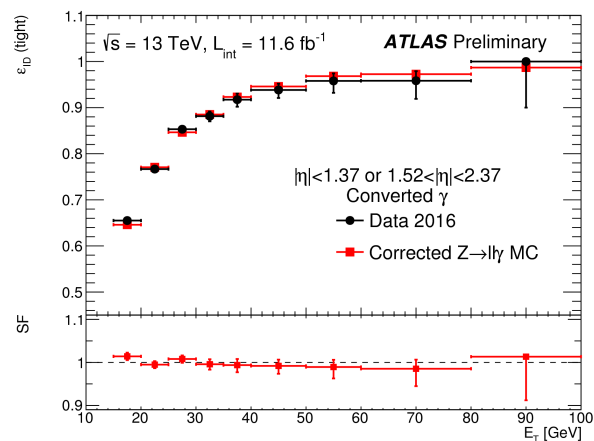
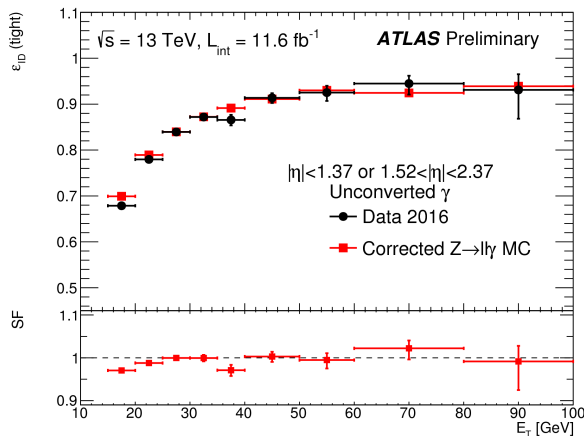


光子の同定 (ATLAS)

- 電磁シャワー形状の解析による光子選別

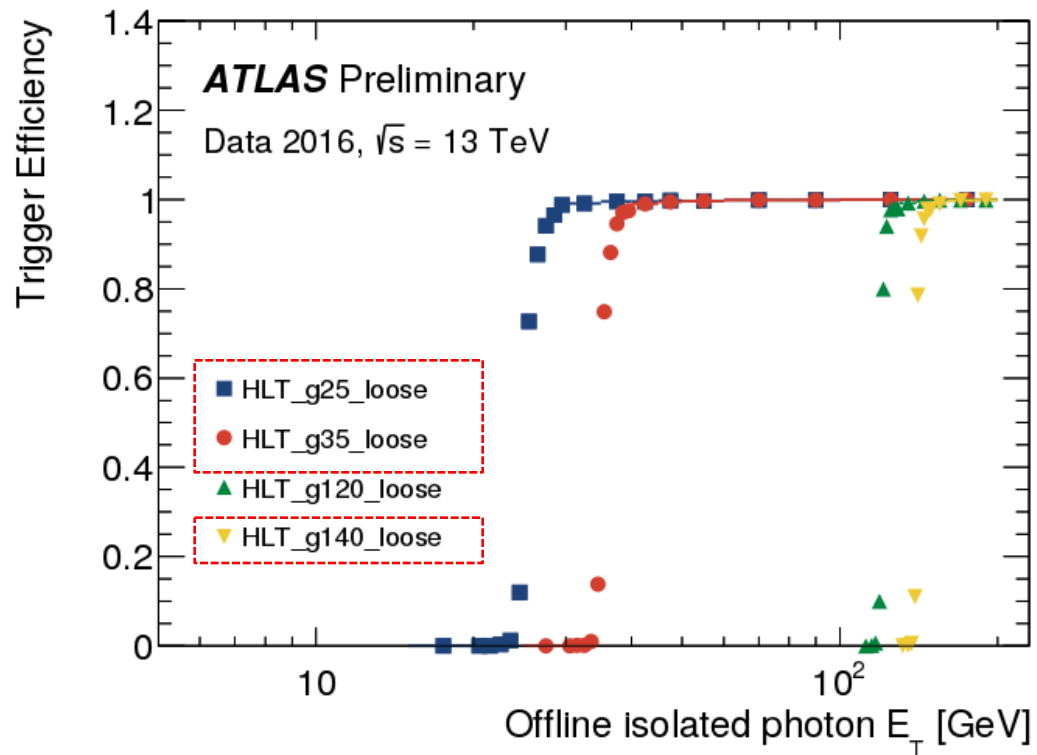


- 同定効率のデータを用いた評価
 - $Z \rightarrow l\gamma$ (Radiative Z) を用いた測定



光子トリガー (ATLAS)

- 2016 年物理ラン
 - 2- γ トリガー
 - 25 GeV x 35 GeV
 - 2 光子共鳴解析
 - High mass
 - 125 GeV Higgs
 - 1- γ トリガー
 - 140 GeV 閾値
 - dijet + ISR
 - γj 共鳴探索

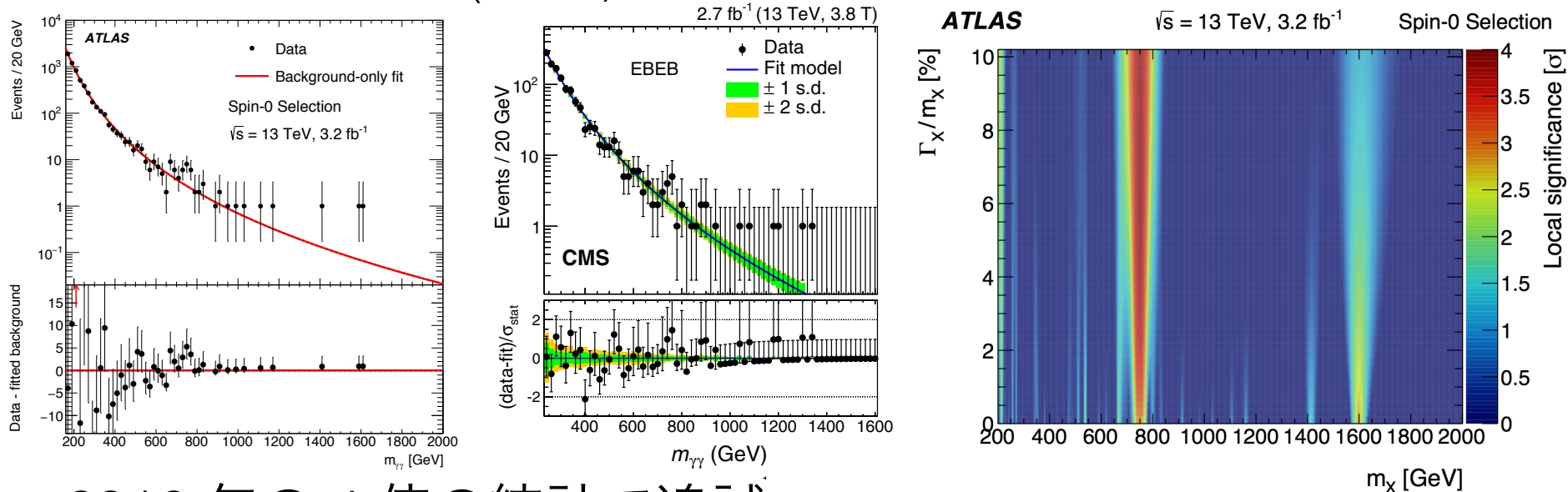


- オフライン光子に対するトリガー効率測定
 - Trigger 効率の plateau でデータ解析

2 光子共鳴探索

2 光子に崩壊する共鳴探索

- 二光子に見える新物理現象の例
 - スカラー、擬スカラー (2HDM / 複合スカラー)
 - Graviton の KK 励起状態
- シンプルなデータ解析
 - スムーズなバックグラウンドスペクトラム上における共鳴を探索
 - 2015 年データ ($\sim 3/\text{fb}$) において超過を観測 @ 750 GeV



- 2016 年の 4 倍の統計で追試

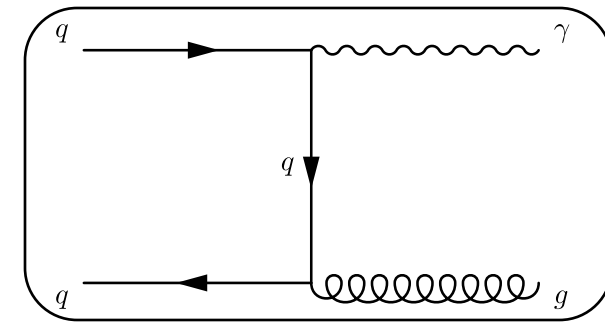
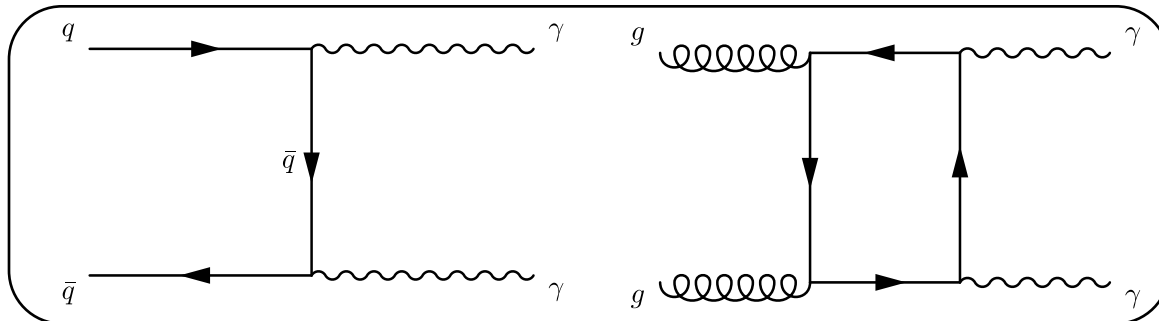
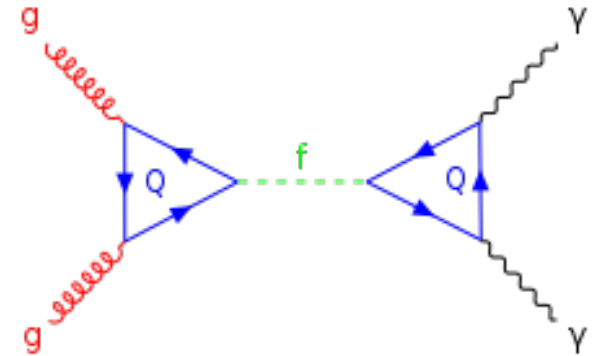
ATLAS : arXiv:1606.03833

CMS : Phys.Rev.Let. 117(2016), no. 5, 051802

信号とバックグラウンド

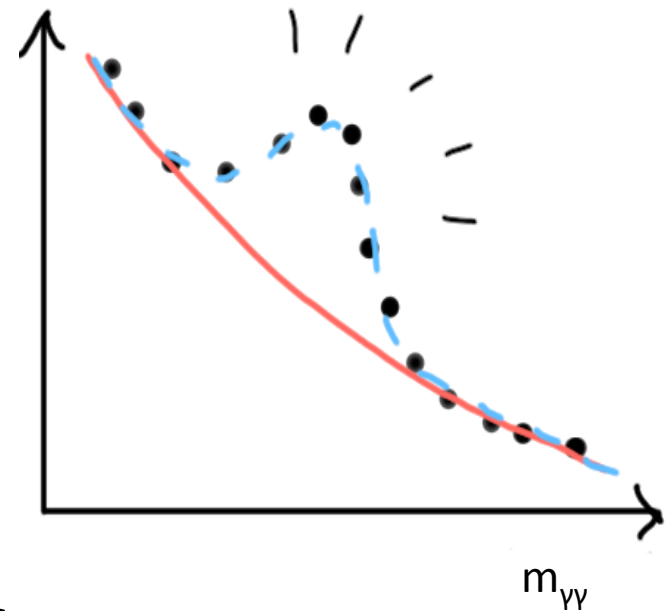
- 新物理の信号
 - Spin-0 共鳴 (例 : High mass ヒッグス)
 - Spin-2 共鳴 (例 : Graviton の KK 励起)
- バックグラウンド
 - 2 光子を含む標準模型事象 (irreducible background)
 - 指数関数的な微分断面積
 - “t-channel” の角度特性
 - 2 光子を含まない標準模型事象 (reducible background)
 - 光子同定 + Isolation カットで落とす

例えば ggF でできて
2 光子に崩壊するスカラー粒子



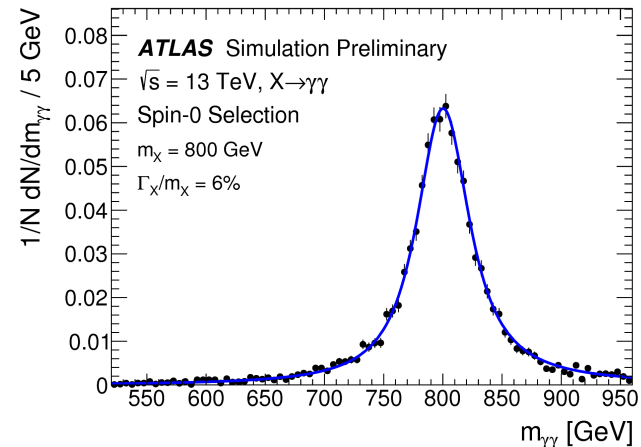
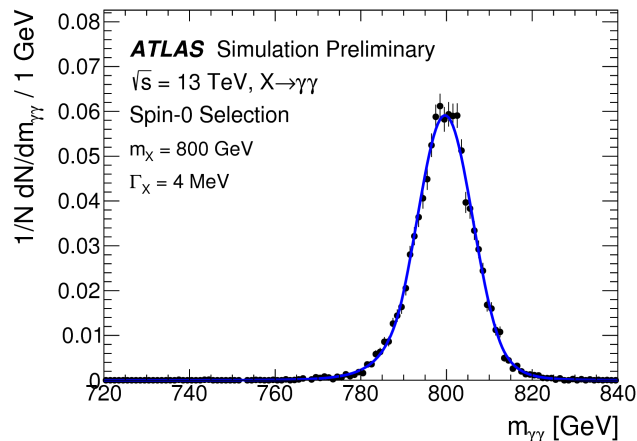
解析のコンセプト (ATLAS)

- 2 光子トリガーによるデータ収集
 - 35, 25 GeV
- オフラインイベント選別
 - 2 つ光子を終状態に検出
 - “Tight” な光子同定
 - Isolation カット
 - 高横運動量
 - イベント毎の 2 光子系の不変質量に相対的なカット
 - $p_{T1} > 0.4M$, $p_{T2} > 0.3M$
 - “Spin-0 解析” と呼ばれるカット
- 不変質量分布を解析し信号 (有無) を決定
 - **バックグラウンド** + **信号** でモデル
(**smooth な指数関数** + **共鳴**)



信号のモデル

- 信号の不変質量分布 (共鳴) のモデル
 - 200 GeV – 2.4 TeV までの質量領域の $\Gamma/m < 10\%$ のシミュレーションサンプルを準備
 - Bright Wigner 共鳴を、Double-Sided Cristal-Ball 関数で畳み込んで、信号共鳴形状を関数系で表現
 - 典型的な検出器の分解能による共鳴の太さ $\sim 1\%$
 - 例 : $\sigma = 2.3$ GeV @ 200 GeV, $\sigma = 15$ GeV @ 2 TeV
 - エネルギー測定分解能が決める場合 (左)
 - 物理のWidth が幅を決める場合の例 (右)



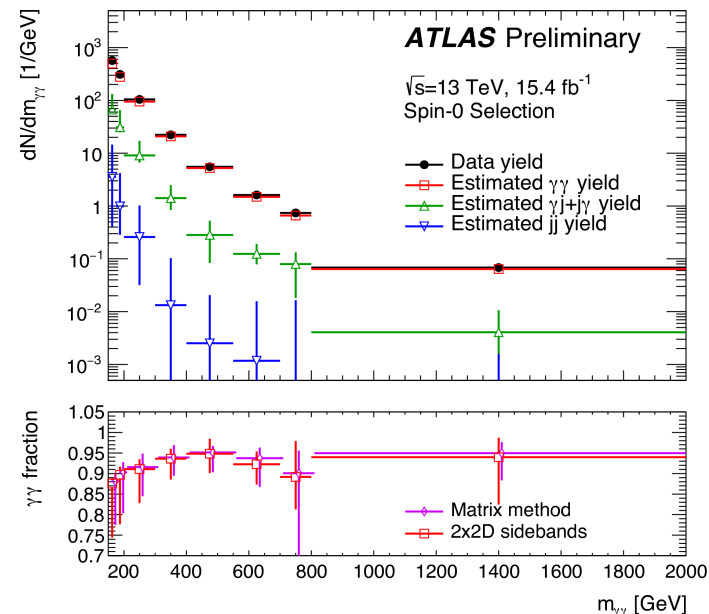
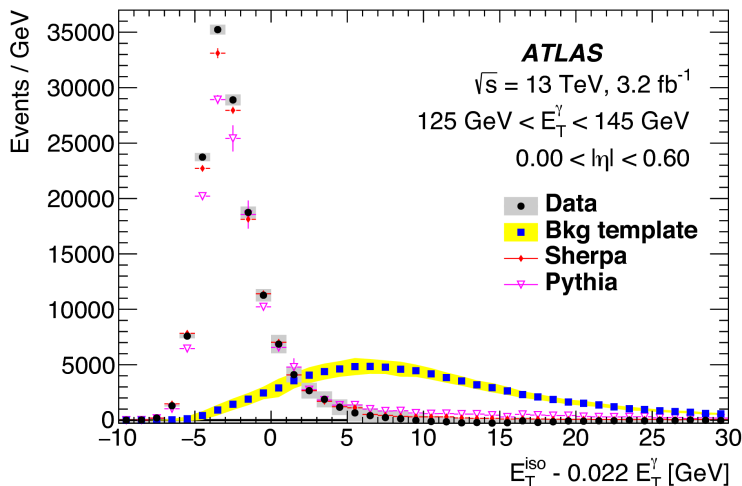
バックグラウンドのモデル

- バックグラウンドで分布をモデル
 - 標準模型の $\gamma\gamma$ 事象の関数系は Sherpa MC を用いて決定
 - γj 、 jj の関数系はコントロールサンプルを用いて決定

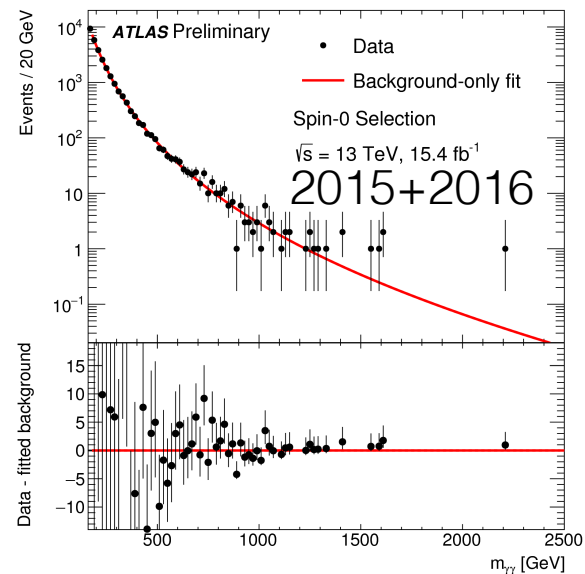
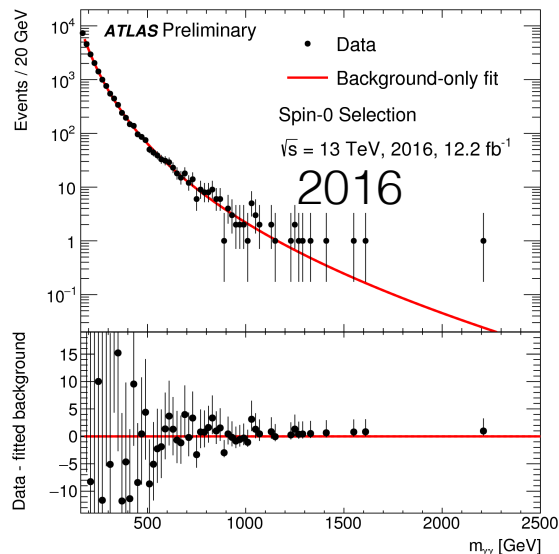
$$f_{(k)}(x; b, \{a_k\}) = N(1 - x^{1/3})^b x^{\sum_{j=0}^k a_j (\log x)^j},$$

- Calorimeter isolation の分布を用いて測定 $\gamma\gamma$ 、 γj 、 jj を成分分解
 - Isolation カットをかけると 90% の purity であることが確認

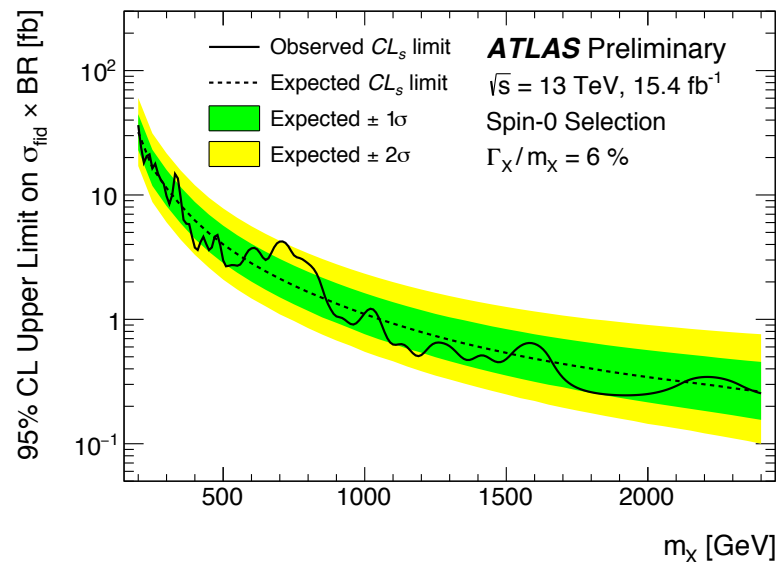
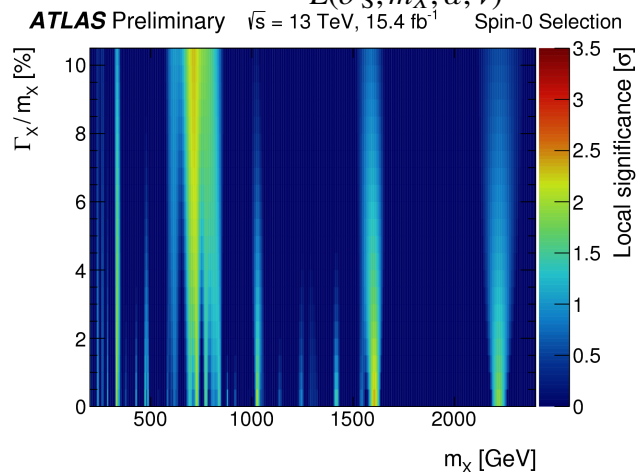
再掲：本物の photon と、fake の photon (jet 由来) の isolation 分布の違い



2016 年データフィット結果



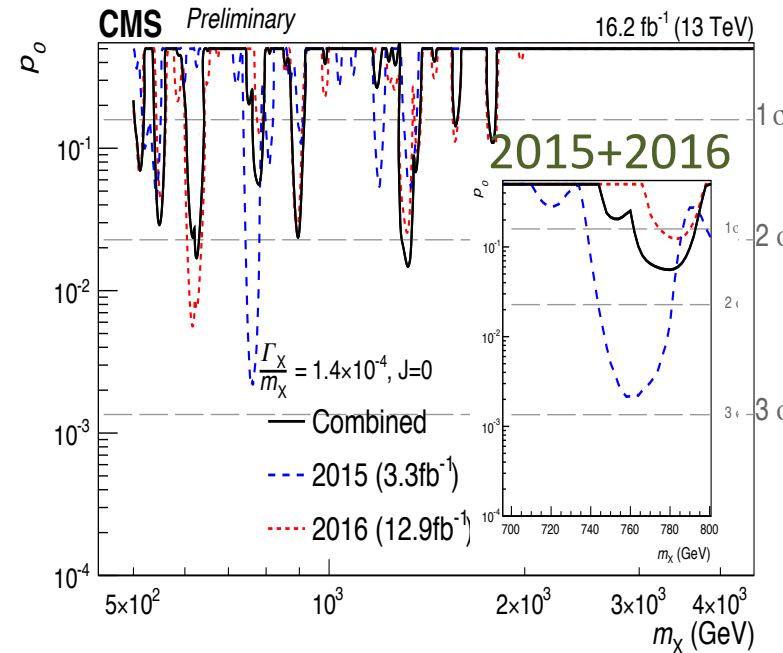
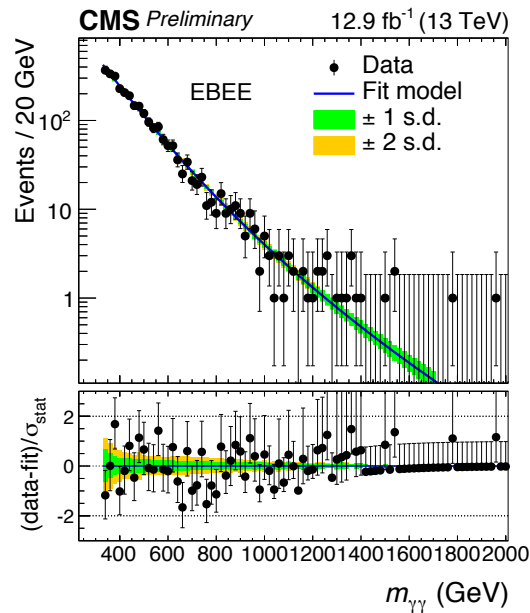
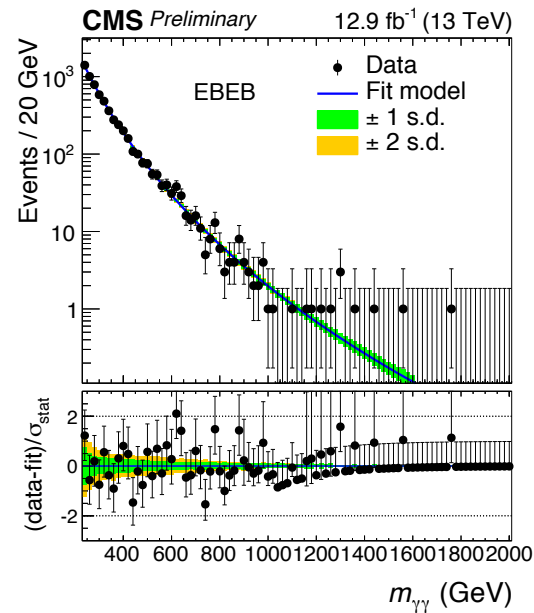
$$q_0(m_X, \alpha) = -2 \log \frac{L(\sigma_S = 0, m_X, \alpha, \hat{\nu})}{L(\hat{\sigma}_S, m_X, \alpha, \hat{\nu})}$$



CMS の結果

Trigger : 2 光子 $p_T > 60$ GeV
 オフライン 2 光子 $p_T > 75$ GeV, $|\eta| < 2.5$
 イベント分類

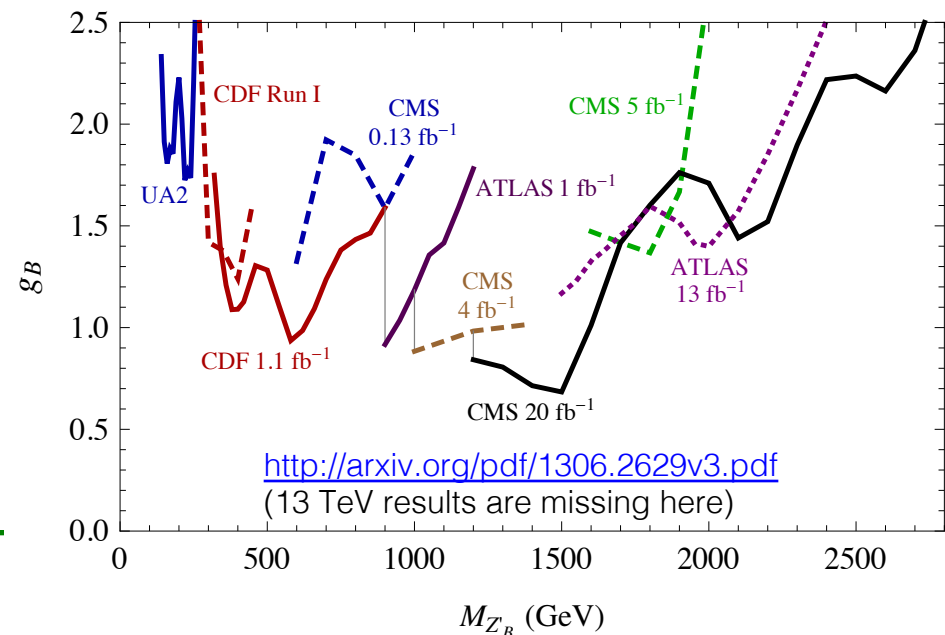
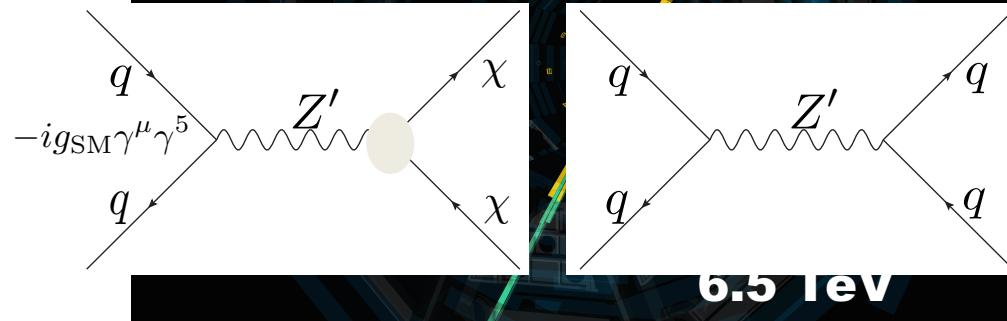
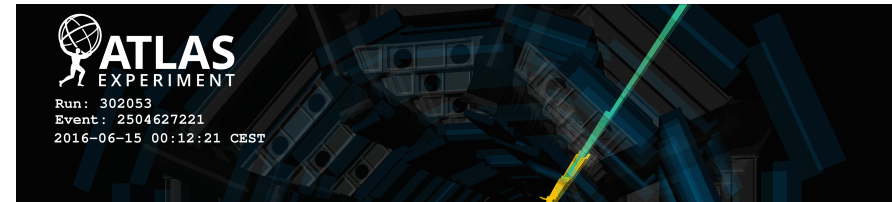
- EBEB 両方共 Barrel
- EBEE 片方 Endcap



2 ジェット共鳴探索

解析戦略

- 新粒子の 2jet 終状態への BF は一般に大きい
 - 終状態のカラーの自由度による
- “High mass” 探索
 - マルチ TeV の共鳴
 - 余剰次元 & 量子重力 (QBH /KK Graviton生成)
 - 複合クォーク模型 (Excited quark)
 - 13 TeV 物理解析の最重要課題
- “Low mass” への拡張の必要性
 - Dark Matter mediator の理解
 - トリガーバイアス
 - ISR をつかった解析
 - Data scouting を用いた解析



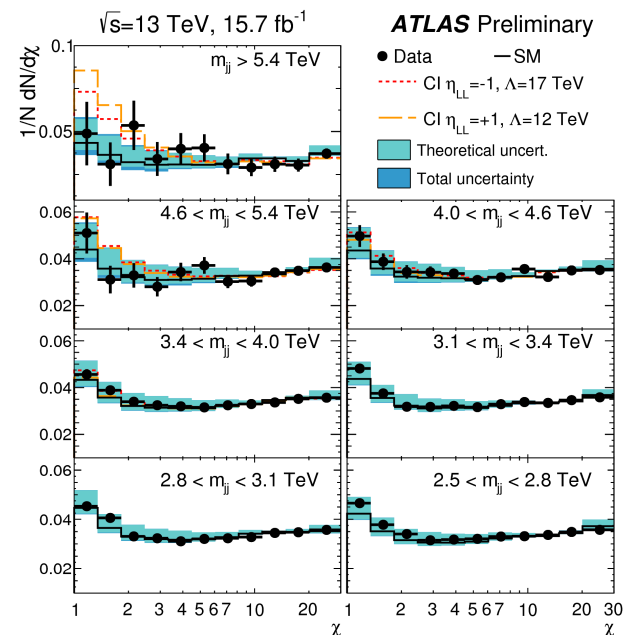
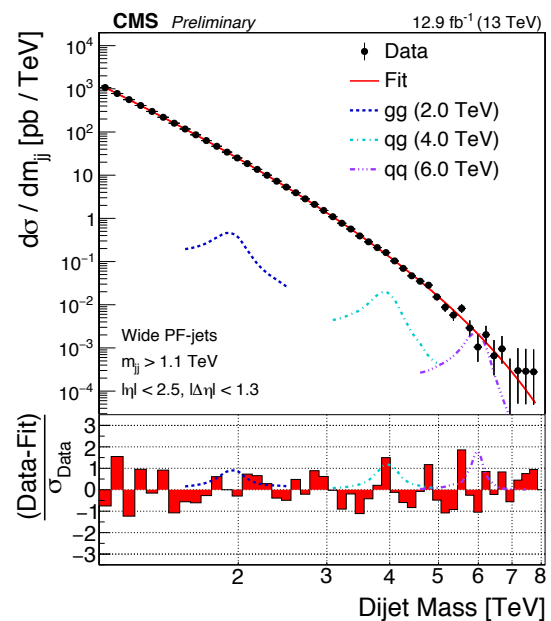
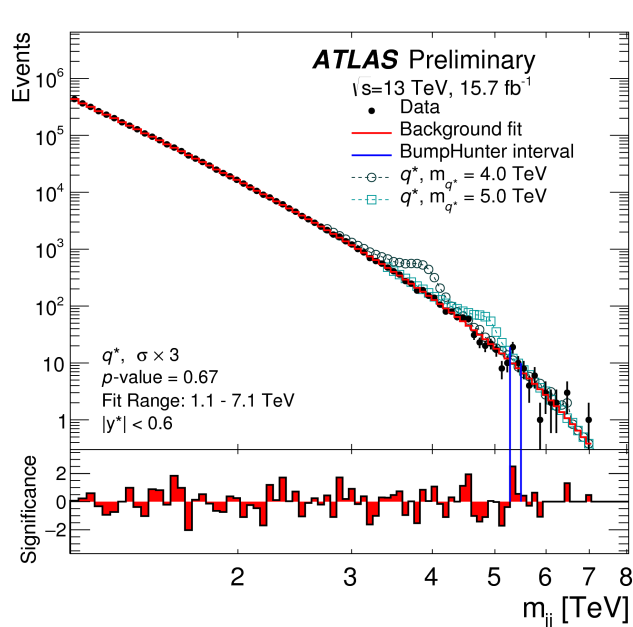
High mass : dijet 探索

模型	ATLAS	CMS
q^*	5.6 TeV	5.4 TeV
ADD QBH (n=6)	8.7 TeV	
RS Graviton		1.9 TeV
W'	2.9 TeV	2.7 TeV
W^*	3.3 TeV	
Λ dim6 (des. intf.)	13 TeV	
Λ dim6 (con. intf.)	20 TeV	

角度解析 (ATLAS)

- Trigger : jet 360 GeV
- $p_{T1} > 440$ GeV, $|\eta| < 2.8$
- $p_{T2} > 60$ GeV
- $y^* = |y_1 - y_2|/2 < 1.7$
- $y_B = 1/2 \ln(x_1/x_2) < 1.1$

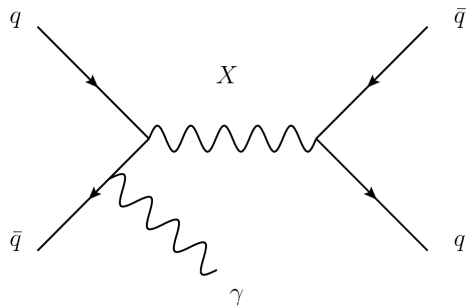
$$\chi = e^{2|y^*|} \sim \frac{1 + \cos \theta^*}{1 - \cos \theta^*},$$



Low mass : ISR + dijet

- シングルジェットトリガーを使った解析は高い p_T を要求 (440 GeV)
 - Mass がバイアスされ 1 TeV より低い領域を議論するのは困難
- ISR の光子 / ジェットでトリガー

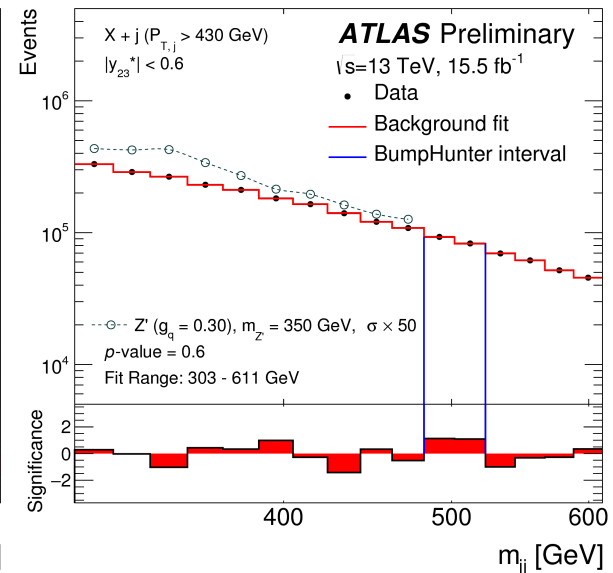
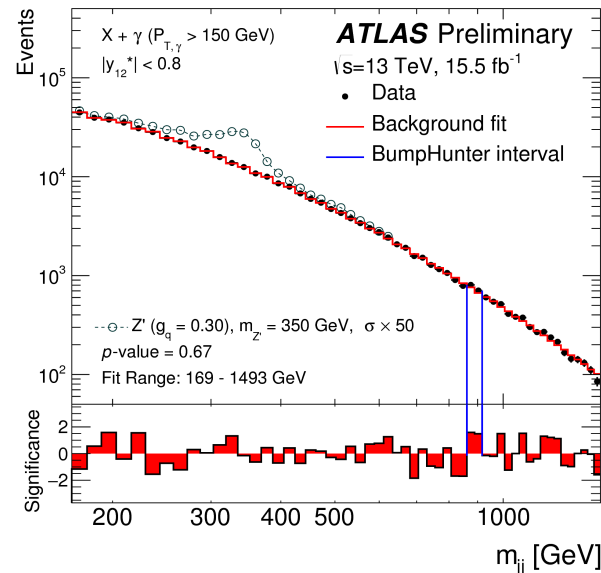
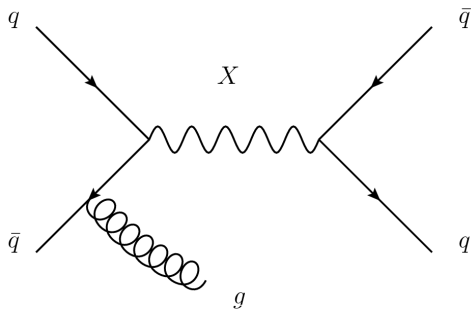
2 jet + ISR (光子)



Trigger : 140 GeV γ
 ISR 150 GeV photon
 2 jet $p_T > 25$ GeV $|\eta| < 2.8$,
 $y^* < 0.8$

Trigger : 380 GeV jet
 ISR 430 GeV photon
 2 jet $p_T > 25$ GeV $|\eta| < 2.8$,
 $y^* < 0.6$

2 jet + ISR (ジェット)

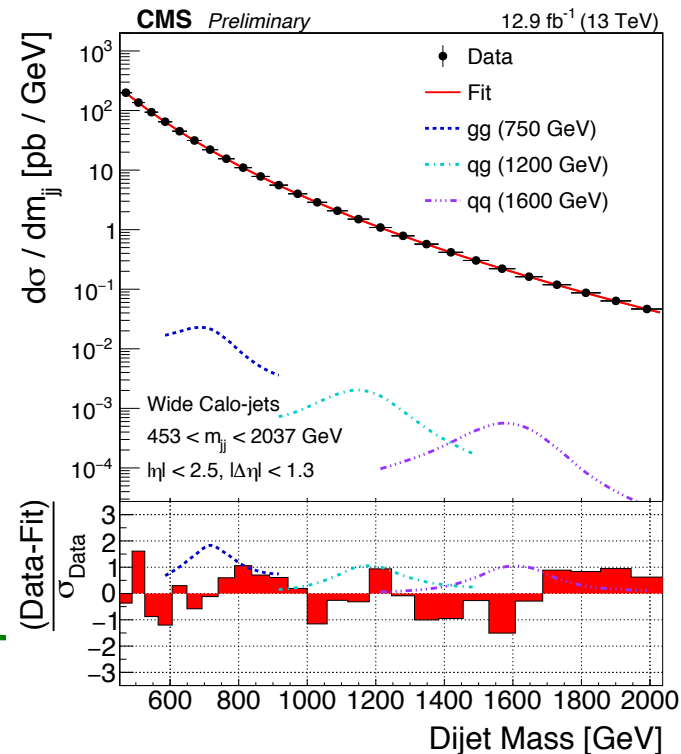
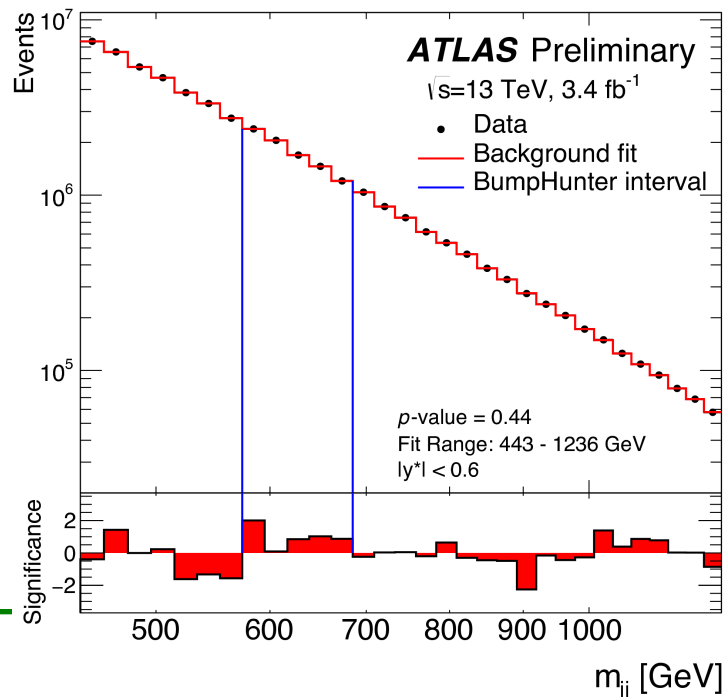


200 GeV – 1 TeV まで $\sim 100 \text{ fb}$ –
 10 fb の断面積をもつ共鳴を棄却

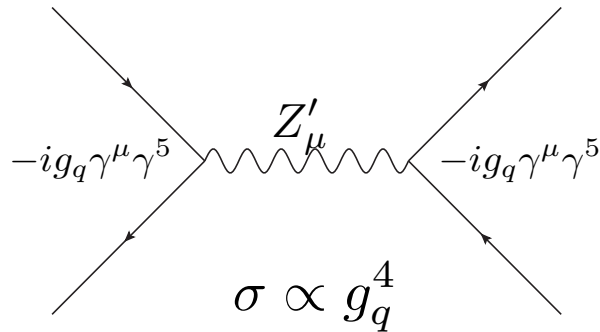
350 – 550 GeV まで $\sim 100 \text{ fb}$ の
 断面積をもつ共鳴を棄却

Low mass : Trigger-object level analysis

- HLT-reconstructed jet のみを high rate で記録する
特別なデータ収集法 (“data scouting”)
 - ATLAS : “L1 jet trigger (J75)” を満たしたイベントを収集
 - 低い Jet pT カットで解析 (440 GeV \rightarrow 185 GeV)
 - CMS : HLT の trigger 条件を緩和
 - HT 800 GeV \rightarrow 250 GeV
- $M(jj) \sim$ 500 GeV まで共鳴探索の範囲を拡大



ダークマターに対する解釈

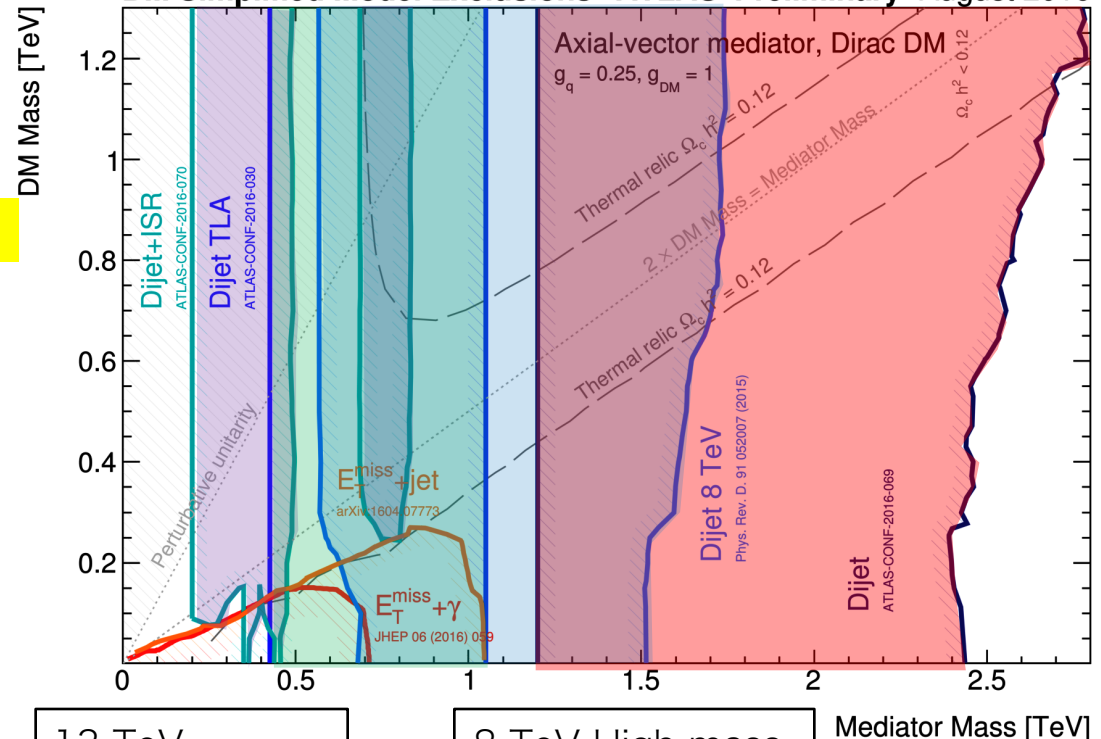


断面積の上限を g_q の上限に焼き直し

13 TeV
TLA dijet 探索

13 TeV High mass
dijet 探索

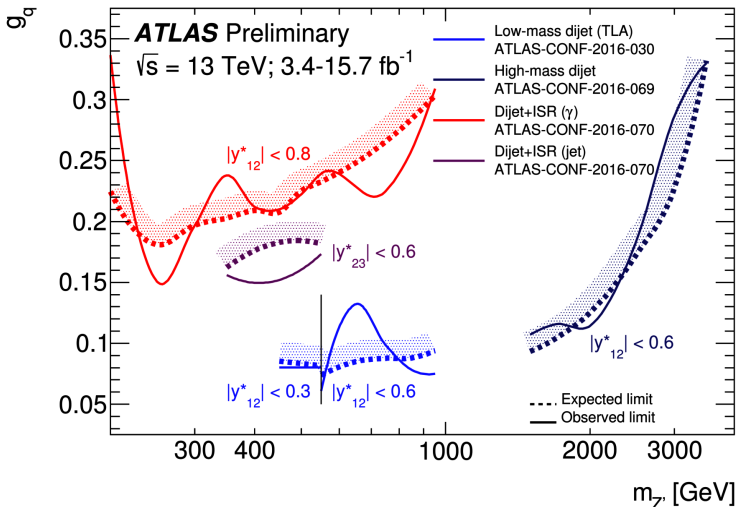
DM Simplified Model Exclusions ATLAS Preliminary August 2016



13 TeV
dijet + ISR 探索

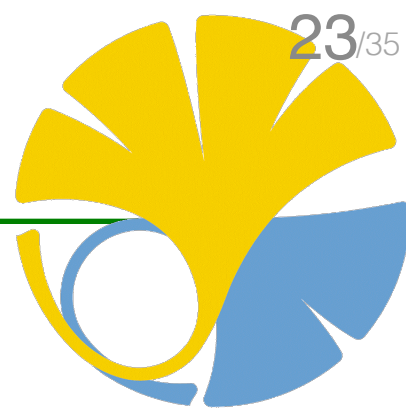
8 TeV High mass
dijet 探索

Mediator Mass [TeV]



$g_q=0.25$ の棄却領域

Note : 講演後 8 TeV の棄却領域の塗りつぶしが正しくなかったのを修正しました。



光子 + ジェット共鳴

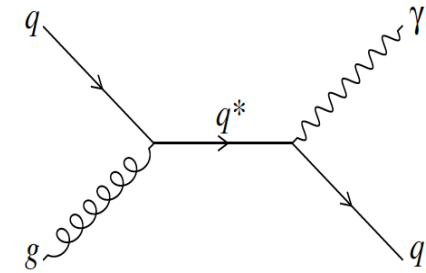


光子 + ジェット共鳴探索

High mass 2 jet 共鳴探索と相補的

模型	ATLAS	CMS
q^*	4.4 TeV	4.4 TeV
ADD QBH (n=6)	6.2 TeV	
RS QBH (n=1)	3.8 TeV	

高分解能

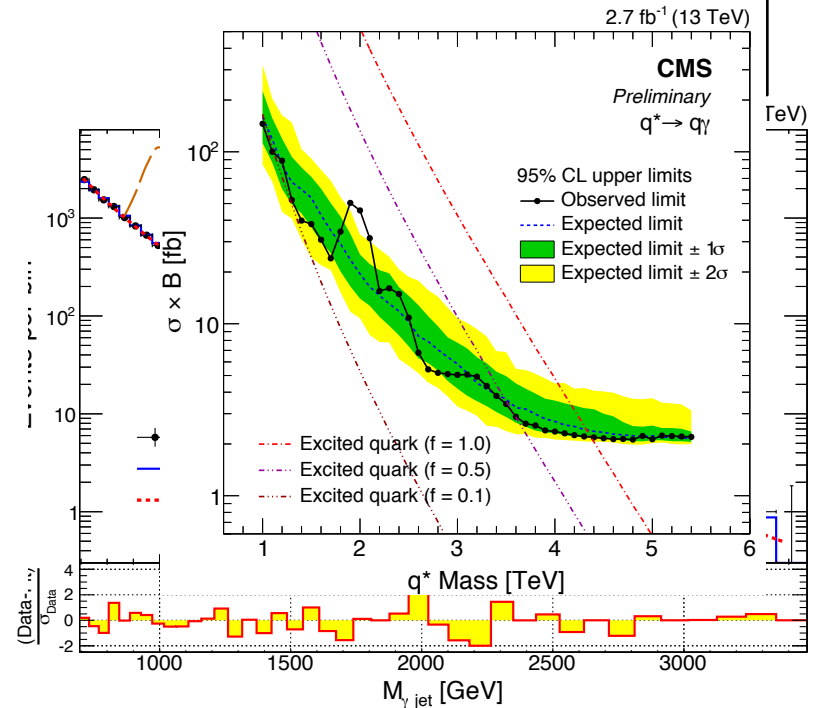
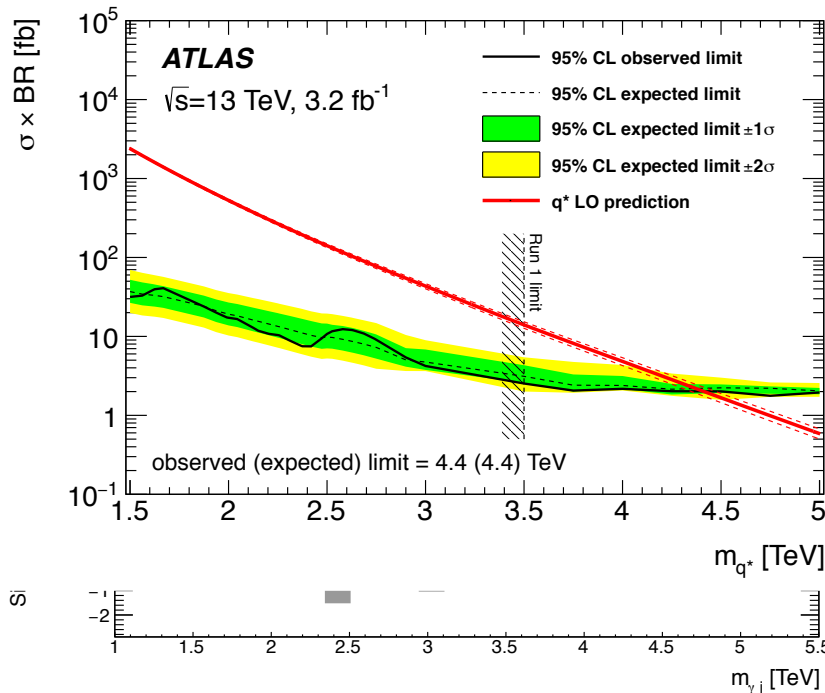


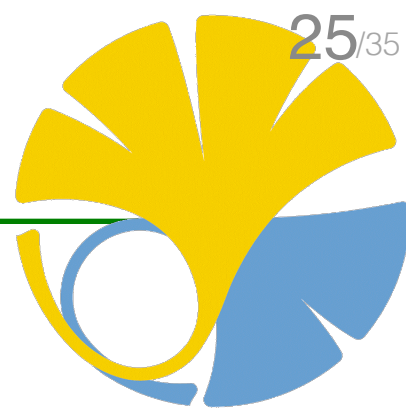
ATLAS 解析

- Trigger @ γ 140 GeV
- Isolated γ pT 150 GeV

CMS 解析

- Trigger @ γ 175 GeV
- Isolated γ pT 190 GeV





荷電レプトンを含む終状態 に注目した共鳴探索



$W' \rightarrow l\nu$ 探索

シングル電子トリガー

(medium 60GeV, loose 140GeV)

$|\eta| < 2.47$, veto $1.37 < |\eta| < 1.52$

電子 ID (tight Likelihood)

Isolation カット

MET > 65 GeV

74% (2TeV)

69% (4TeV)

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

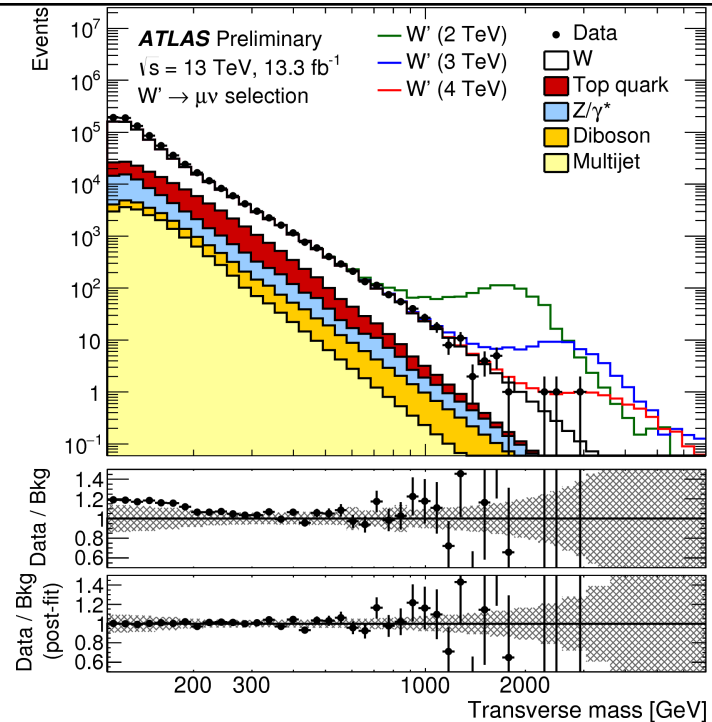
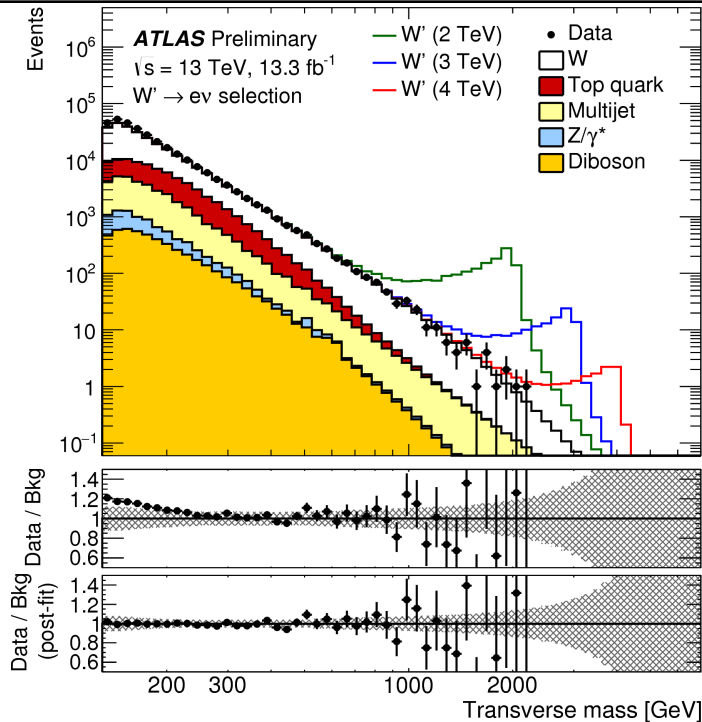
それぞれの検出層に 3 ヒット

Veto muons in $1.01 < |\eta| < 1.10$

MET > 55 GeV

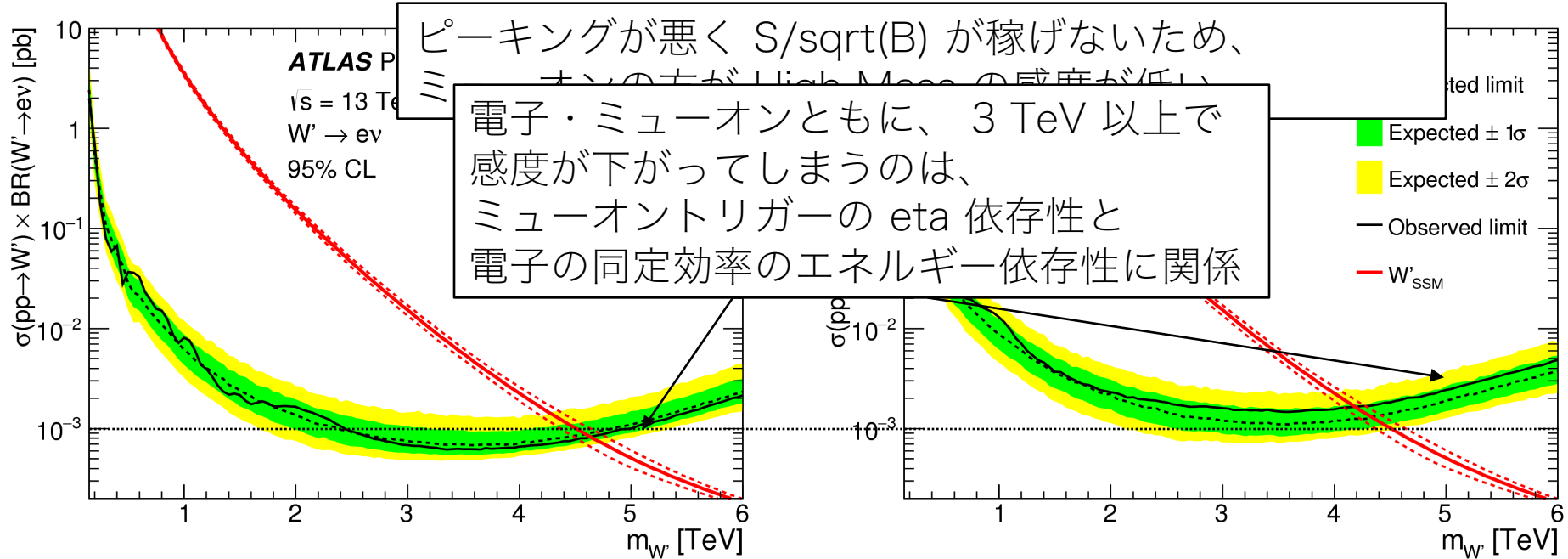
53% (2TeV)

49% (4TeV)



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

$W' \rightarrow \nu$ 探索



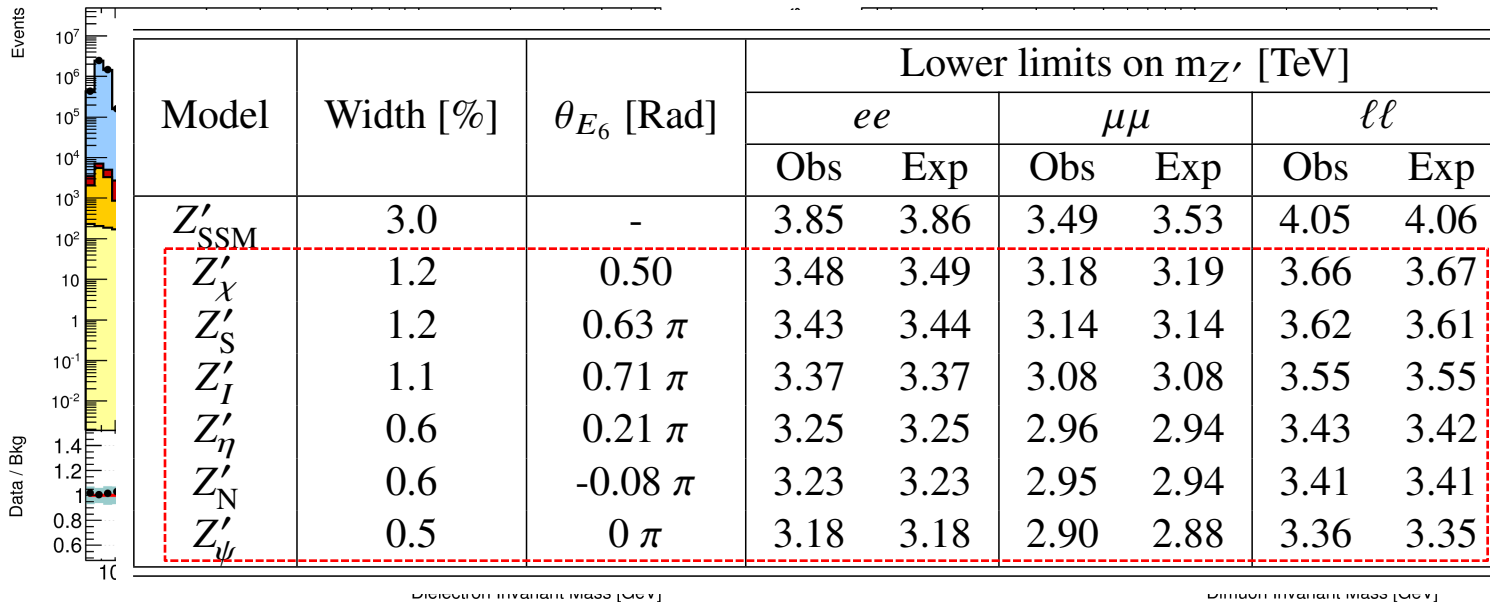
W' 質量を仮定した際の Sequential Standard Model の棄却 (95% CL)

電子チャンネル : $m_{W'} = 4.6 \text{ TeV}$ (4.6 TeV expected)

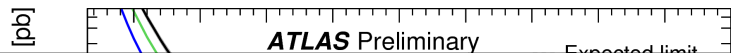
ミュオンチャンネル : $m_{W'} = 4.2 \text{ TeV}$ (4.3 TeV expected)

Combined results : $m_{W'} = 4.7 \text{ TeV}$ (4.8 TeV expected)

Z' → ll 探索 (ATLAS)



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'



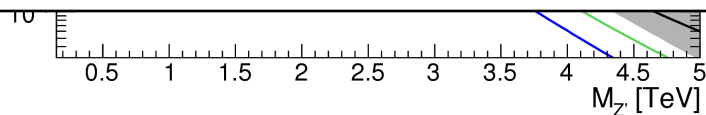
電子チャンネル選別:

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, $|\eta| < 2.5$,

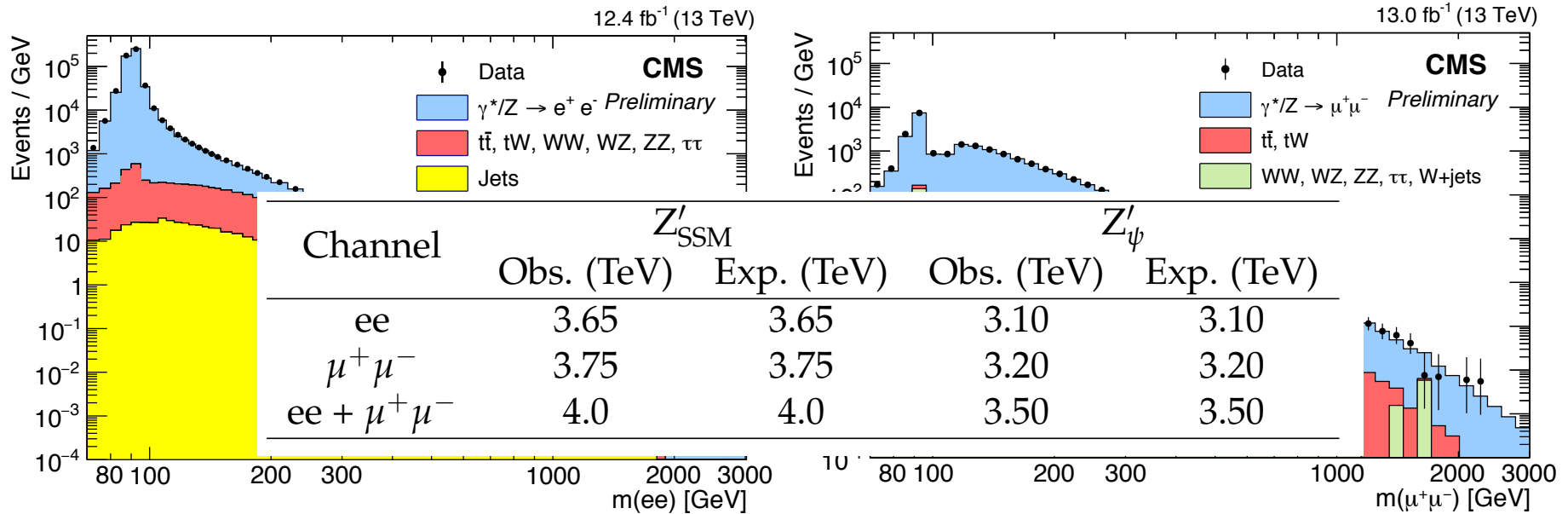
Isolation カット

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')

Z' → II 探索 (CMS)



電子チャンネル選別:

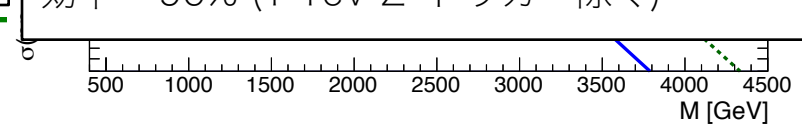
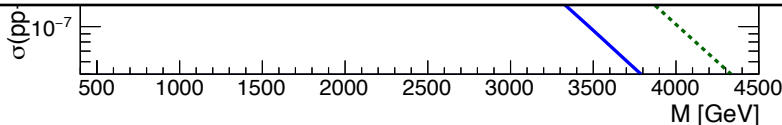
トリガー 2 電子 (33 GeV)
 2 電子 $p_T > 33$ GeV, $|\eta| < 2.5$,
 Isolation カット

効率 ~ 66-69% (1 TeV Z' - トリガー除く)

muon チャンネル選別:

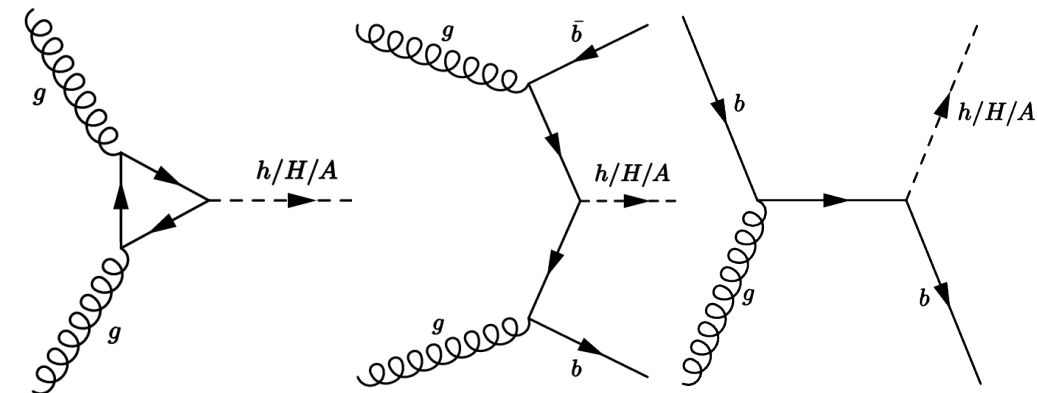
トリガー 1 ミューオン 50 GeV
 2 ミューオン $p_T > 53$ GeV, $|\eta| < 2.4$,
 Isolation cut
 (radiative muon にたいする special fit)

効率 ~ 90% (1 TeV Z' トリガー除く)



第三世代に注目した探索 (2HDM に注目)

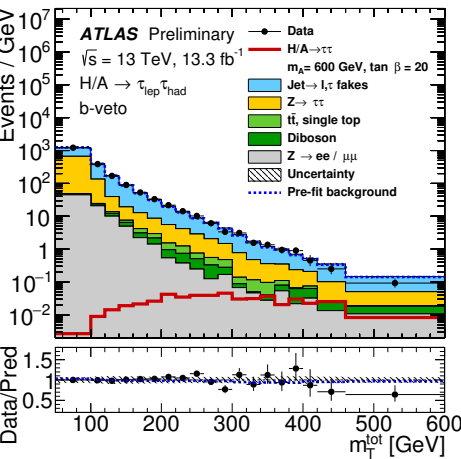
$\tau\tau$ 共鳴 (ATLAS)



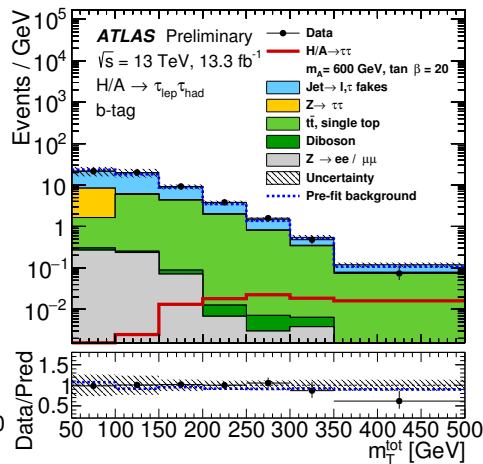
$$m_T^{\text{tot}} = \sqrt{m_T^2(E_T^{\text{miss}}, \tau_1^{\text{vis}}) + m_T^2(E_T^{\text{miss}}, \tau_2^{\text{vis}}) + m_T^2(\tau_1^{\text{vis}}, \tau_2^{\text{vis}})}$$

τ (レプトニック) + τ (ハドロニック)

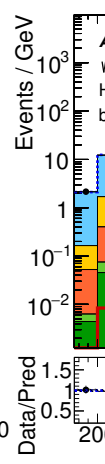
- MET or single μ/e トリガー
- MET > 150 GeV (MET トリガー イベントのみ)
- 1 iso lepton $p_T(l) > 30$ GeV
- $p_T(\tau) > 25$ GeV, $|\eta(\tau)| < 2.3$
- $\Delta\phi(\tau, l) > 2.4$, $m_T < 40$ GeV



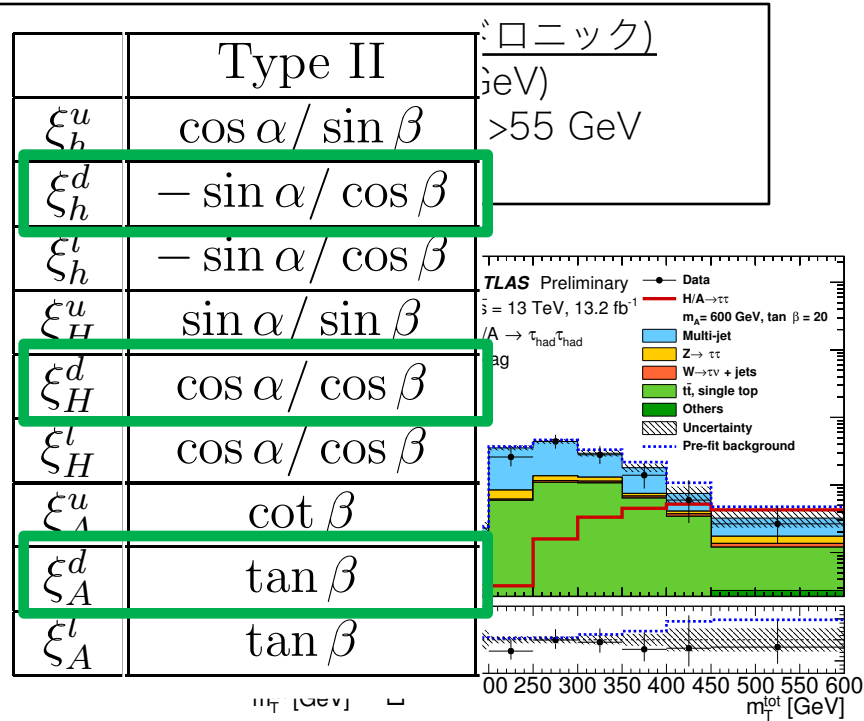
(a) $\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$ b -veto category



(b) $\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$ b -tag category



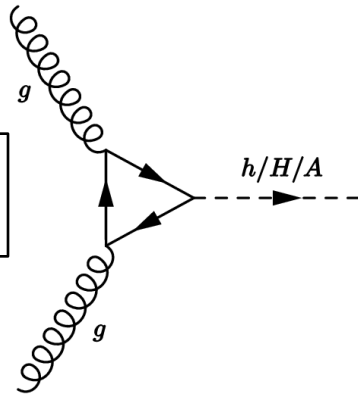
(d) $\tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}}$ b -veto category



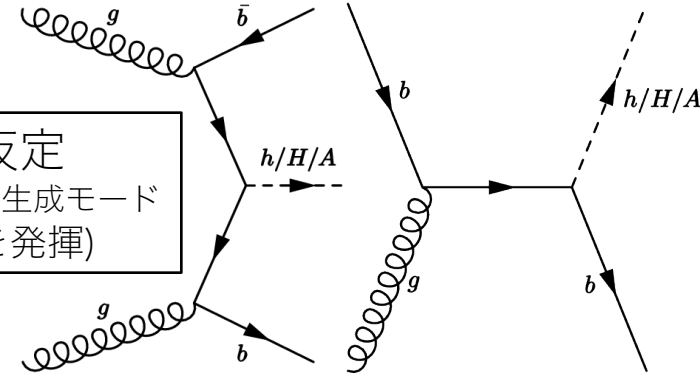
(e) $\tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}}$ b -tag category
($p_T(\tau_2) > 60$ GeV)

$\tau\tau$ 共鳴 (ATLAS)

ggF を仮定
(b-veto 選別)

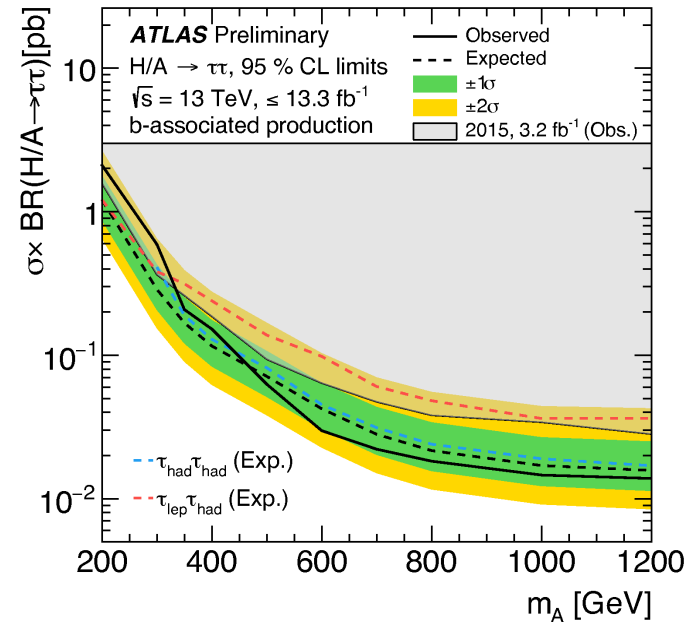
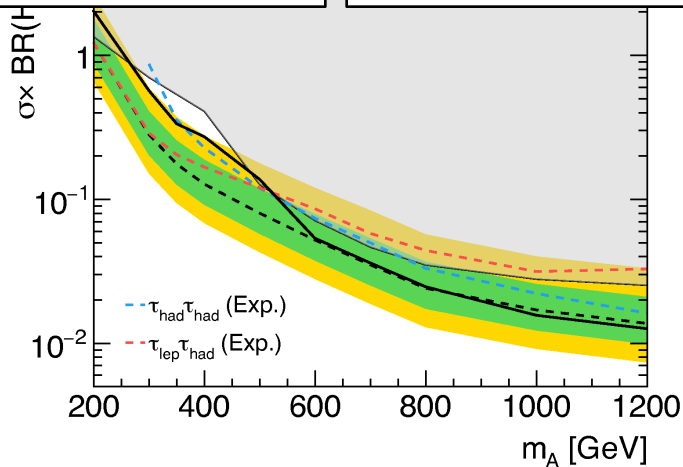


bb→H 生成を仮定
tanβ が大きい時に主な生成モード
(b-tag 選別が威力を発揮)

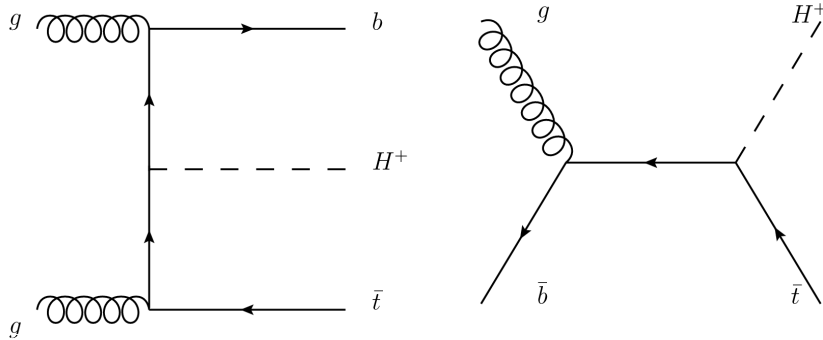


Low mass では
lep-had チャンネル
がリード
(バックグラウンド的に有利)

High mass では
had-had チャンネル
がリード
(タウの分岐比的に有利)

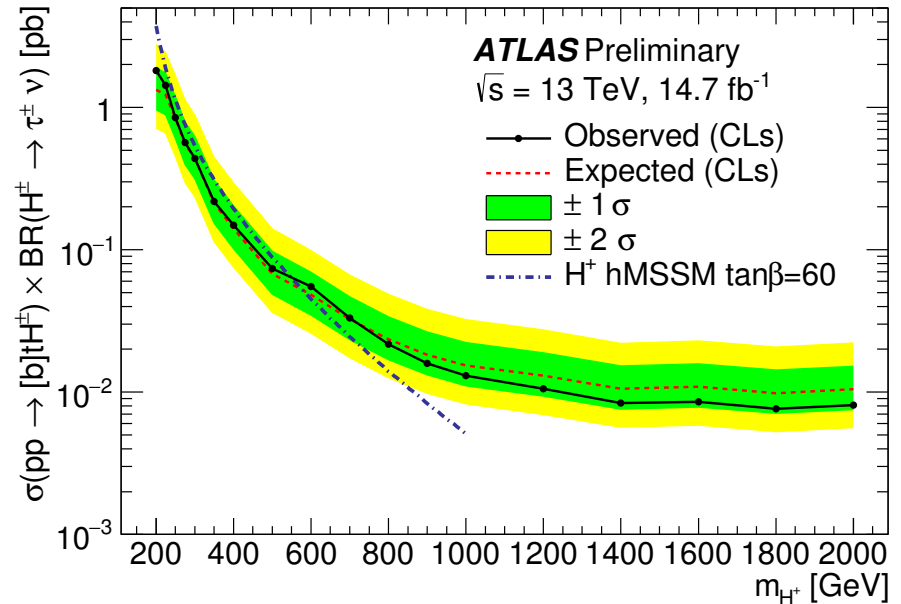
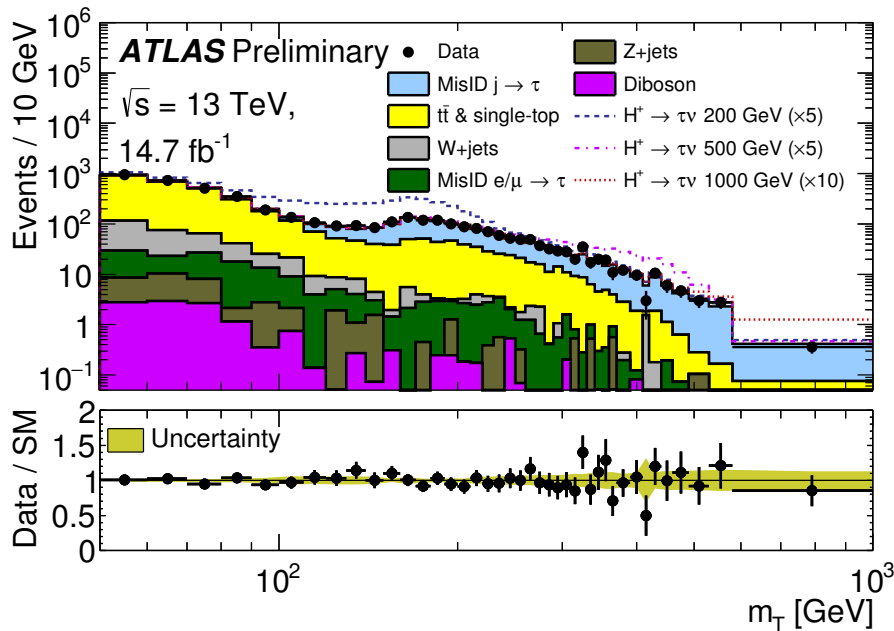


$\tau\nu$ 共鳴 (ATLAS)

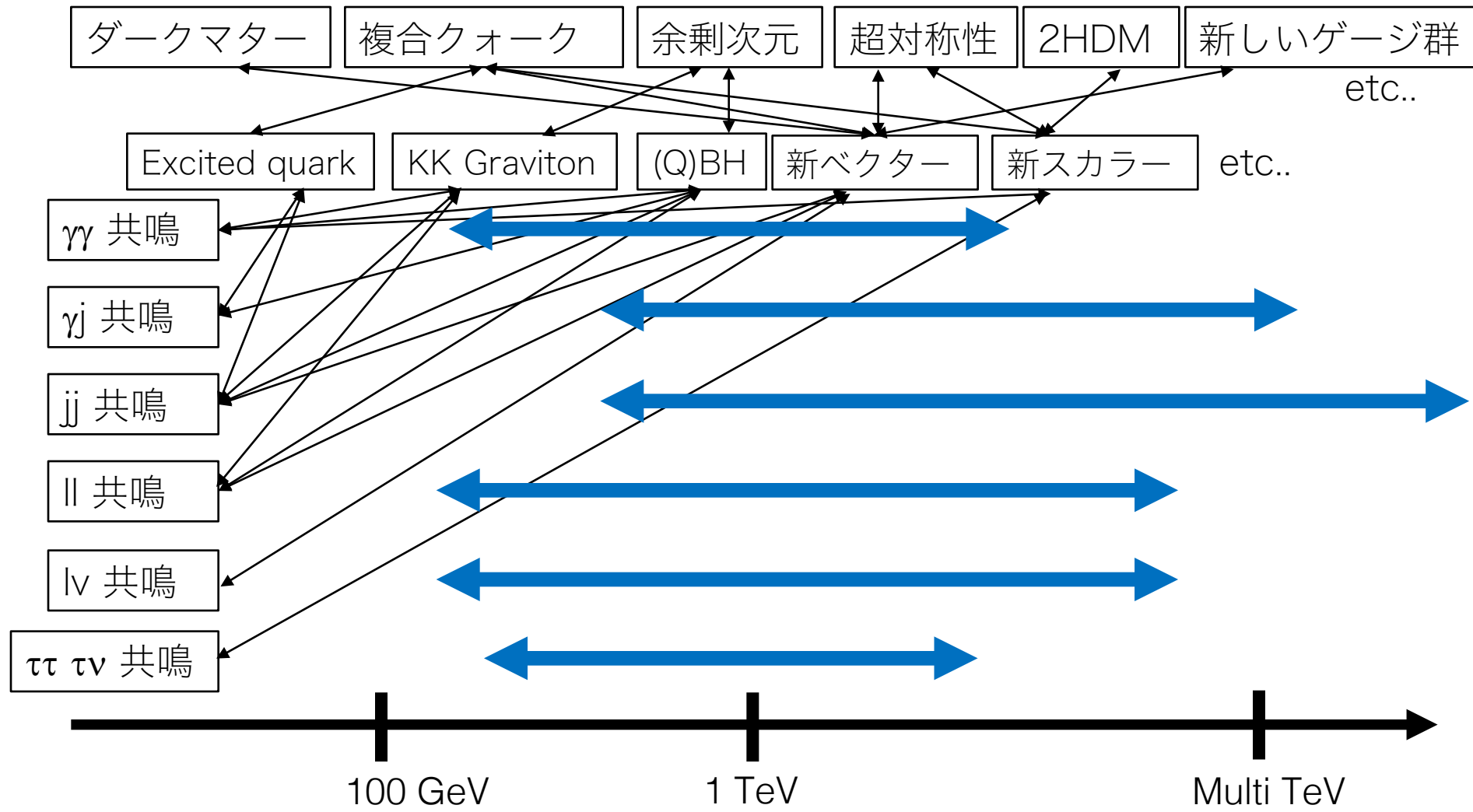


選別条件

MET トリガー (90 GeV)
 τ (ハドロニック) >40 GeV
 3 or more jets ($p_T > 25$ GeV)
 at least one b-tagged jet
 e/μ veto (20 GeV)
 MET > 150 GeV



共鳴探索としてのアプローチのまとめ



まとめ

- 750 GeV 2 光子のアップデート (12-15/fb)
 - ATLAS/CMS とともに 2015 年の超過は再現されず
 - 仕切り直し
 - 多角的な共鳴探索を $O(100\text{GeV})$ – multi TeV で進行中
 - 広いパラメタ (質量) 領域をカバー
 - Low mass dijet 共鳴の探索手法の確立
 - 様々なイベントトポロジーで多くの物理シナリオをカバー
 - 今の所新物理の兆候はなし、探索を継続
 - 時間の都合でカバーできなかった内容
 - $l\bar{l}$ 共鳴探索 (レプトクォーク)、 $Z\gamma$ 共鳴探索 (2 光子と相補的)
 - 共鳴以外の the exotic な探索 (長寿命、高電荷粒子探索等)
 - 他にもたくさん
 - ATLAS / CMS の public page でご確認ください
-