

# LHCでのExotic粒子探索

陣内 修

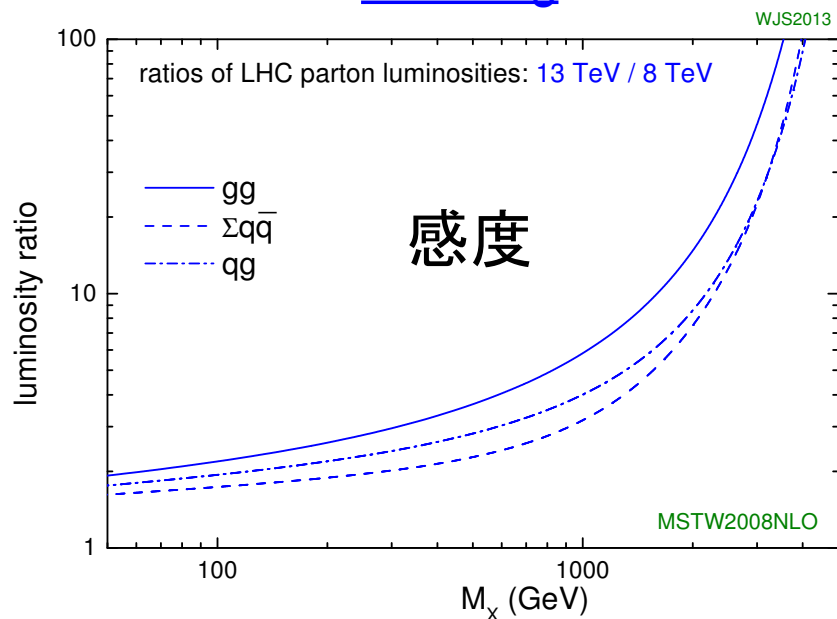
東京工業大学

2016. 9. 5-9 於 京都大学 基礎物理学研究所

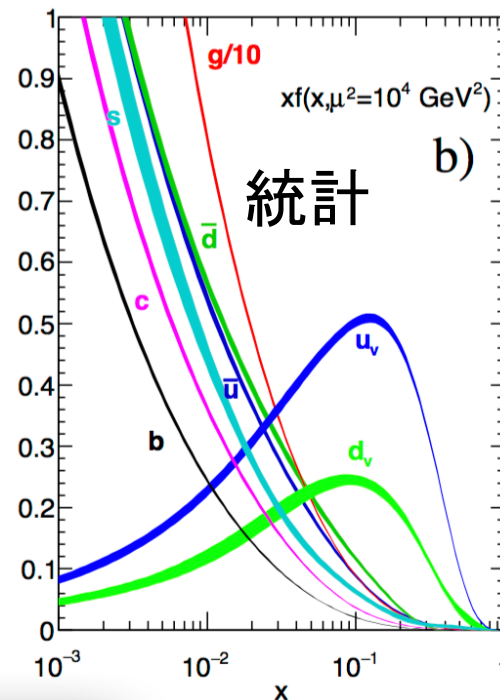
基研研究会 素粒子物理学の進展2016

# SUSY以外のBSM in LHC13TeV

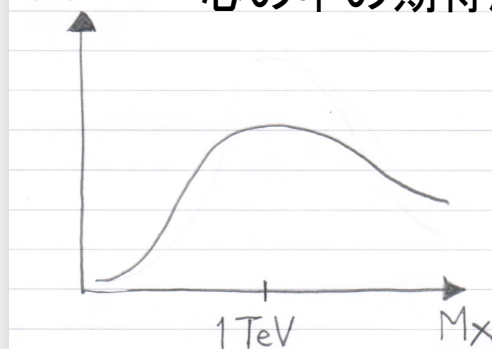
[J. Stirling](#)



[PDG online](#)  
NNPDF3.0 (NNLO)



期待度  
初期データにおける  
心の中の期待度



2016年は今後の取り組み方  
を決める大一番



## SUSY以外のBSM探索

- Di-photon 750 GeV 共鳴探索
- Di-boson共鳴探索 (江成さんのトーク)
- Dark Matter 探索
- その他 BSM 探索
- まとめ

# Di-photon 共鳴探索

## 利点

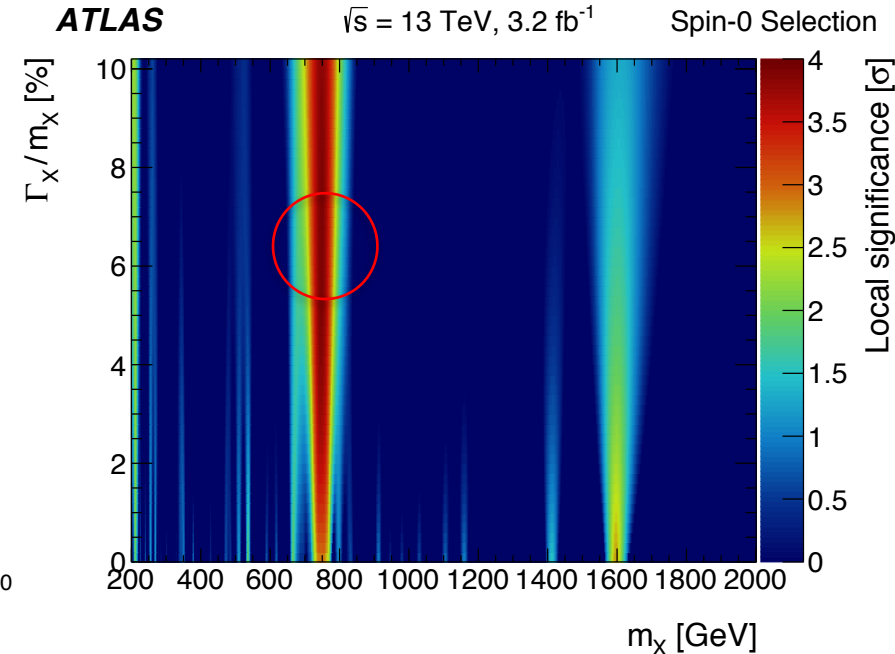
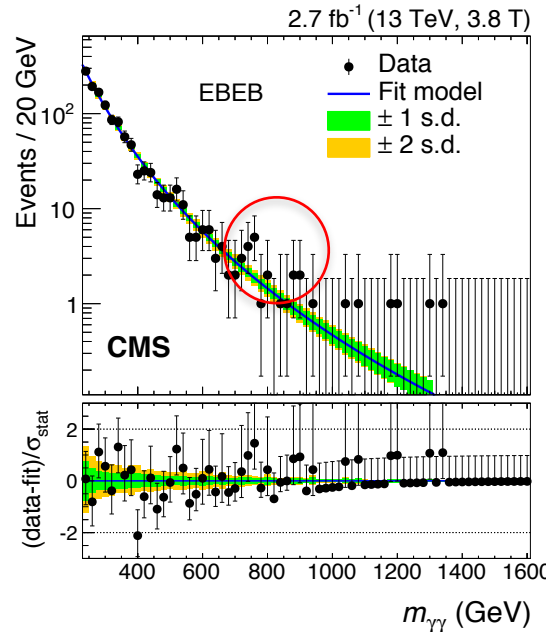
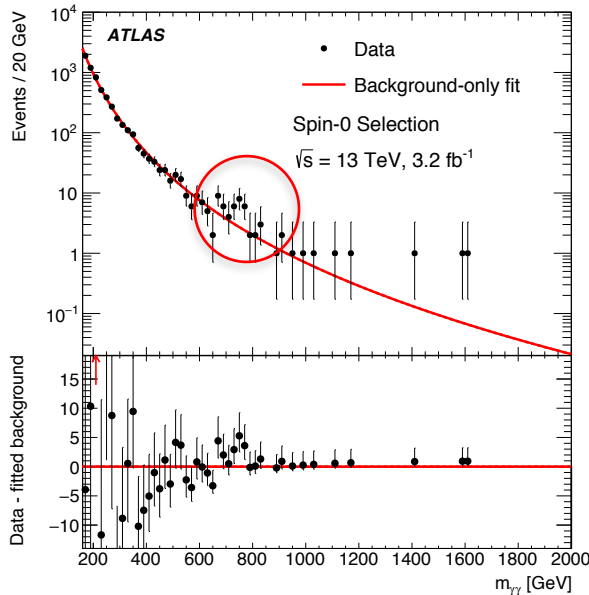
LHC物理の中では比較的BGが少なめ  
質量分解能が抜群(Higgs発見)



## m=750GeV付近に目立つ超過

[arXiv:1606.03833](https://arxiv.org/abs/1606.03833)

[PRL 117\(2016\)051802](https://arxiv.org/abs/1605.1802)



- ATLAS: local  $3.9\sigma$  global  $2.1\sigma$  (太幅近似 6%)
- CMS: local  $3.4\sigma$  global  $1.6\sigma$  (狭幅近似 0.014%)

13TeVの初年度、両実験で同じ質量→

大きな期待(400本以上の現象論papers)

Run2の2年目(2016) 約4倍の統計での検証

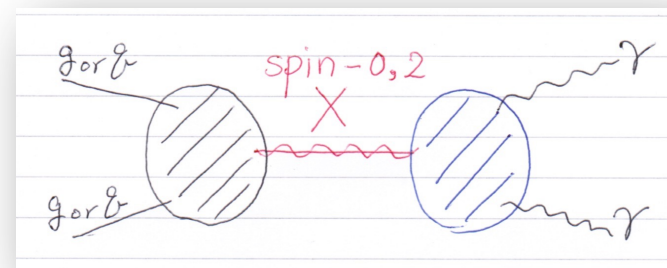
# 解析の概要

- 共鳴を作る信号のベンチマーク
  - Spin-0 (ヒッグスlike)
  - Spin-2 (RS Graviton)
- 2光子終状態の背景事象
  - なららかな連続分布
  - real 2光子標準模型事象  
(irreducible background)
  - fake photon(s)を含む標準模型事象  
(reducible background)

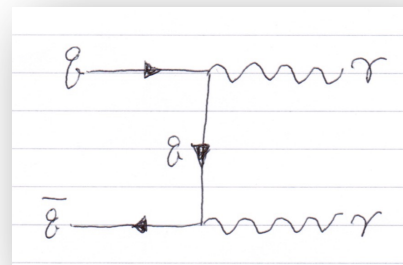
- 1) 2光子トリガーによるデータ収集
- 2) オフラインイベント選別
- 3) 不変質量分布解析

信号 + 背景事象モデル → Fit

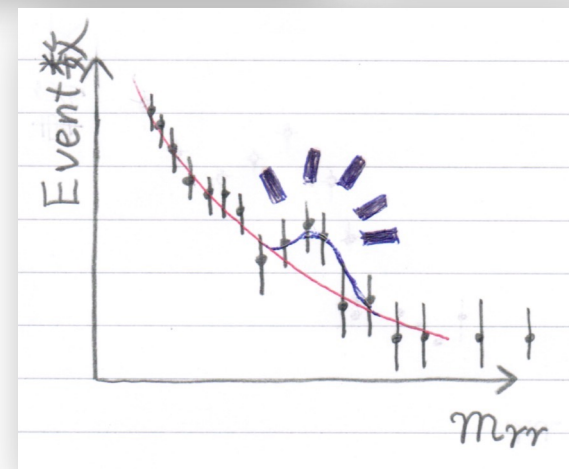
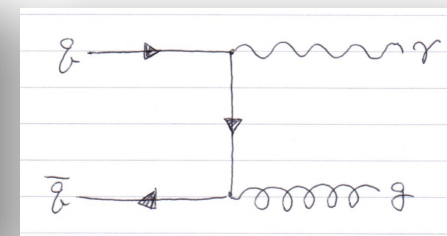
信号

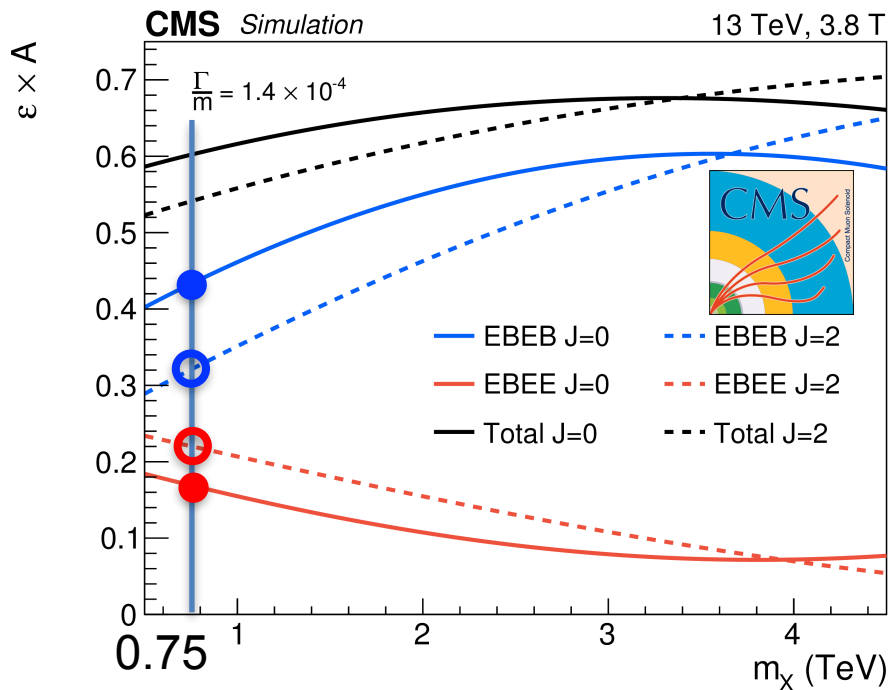
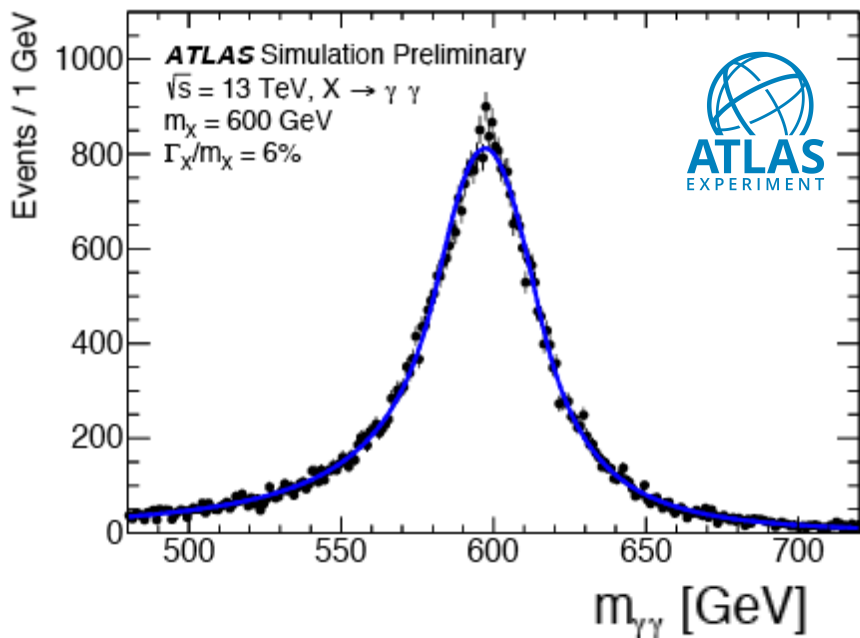


irreducible



reducible





## Heavy Higgs like (or RS Graviton) モデル

Bright Wigner 共鳴

- 狭幅近似 ( $\Gamma_X = 4 \text{ MeV} \sim \kappa/M_{\text{PL}} = 0.01$ )
- 太幅近似 ( $\Gamma_X/m_X < 10\% \sim \kappa/M_{\text{PL}} < 0.3$ )

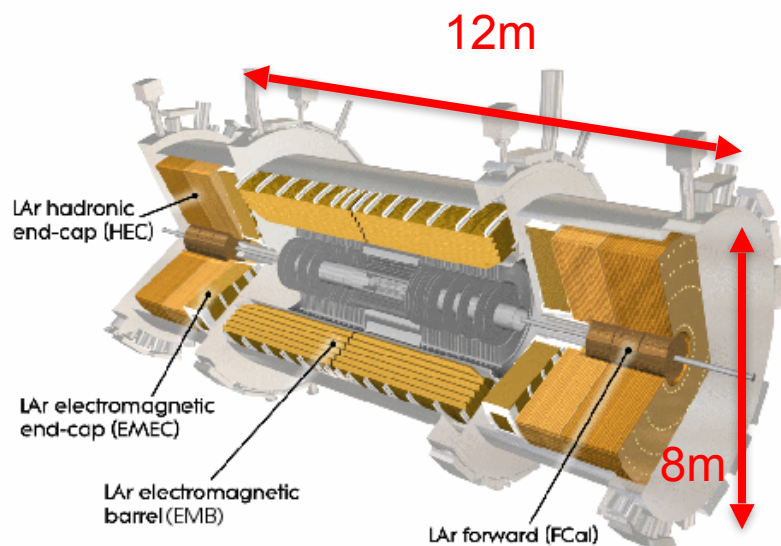
J=0: Barrel-Barrel > Barrel-Endcap

J=2: Barrel-Barrel ~ Barrel-Endcap

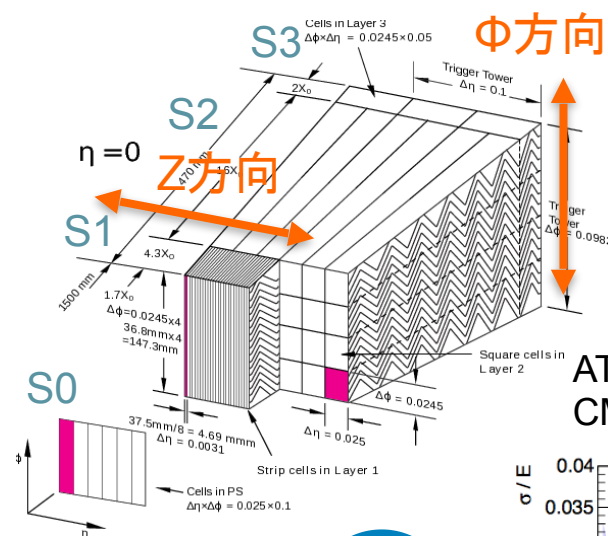
J=0は 中央付近に J=2は 全後方にも

検出器の分解能をDouble-Sided Cristal ball関数  
で畳みこむ ( $\sigma = 2.3 \text{ (15) GeV}$  at  $m = 0.2 \text{ (2.0) TeV}$ )

# 光子の検出・エネルギー測定

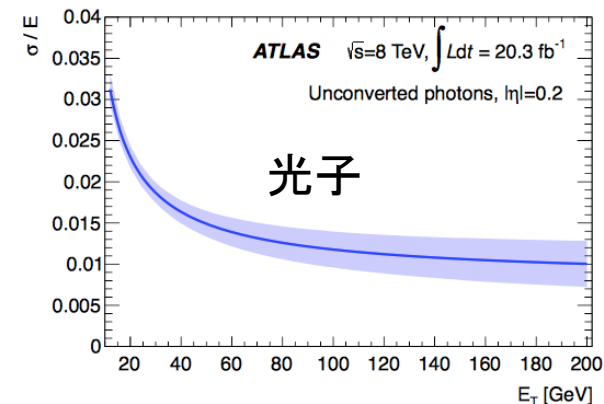


EM Barrel : ( $|\eta| < 1.475$ ) [Pb-LAr]  
 EM End-caps :  $1.4 < |\eta| < 3.2$  [Pb-LAr]



名称	主な役目
S0 Presampler	Energy Loss補正
S1 Strips	$\gamma$ と $\pi^0$ の識別
S2 Middle	エネルギー測定
S3 Back	had/em separation

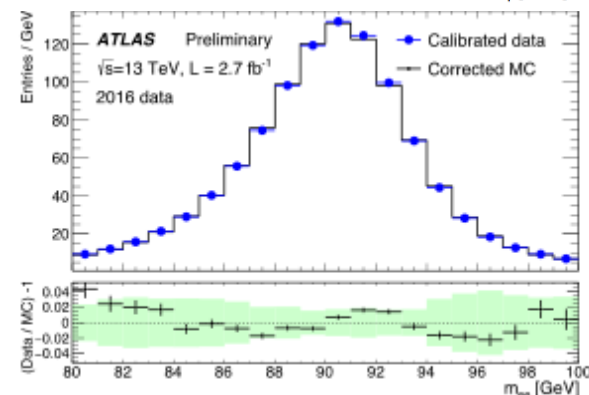
ATLAS :  $a=0.1, b=0.3, c=0.007$   
 CMS :  $a=0.03, b=0.3, c=0.005$



- 電子・光子が生成するEMシャワーのエネルギー測定
- 3層の電磁カロリメータを用いて、位置とエネルギー
- エネルギー分解能

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

- 2016年のデータを用いたエネルギー較正
  - Z→eeデータを用いて性能を確認
  - スケール補正、分解能モデル補正

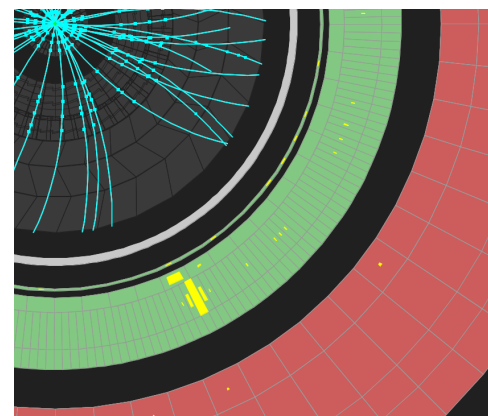
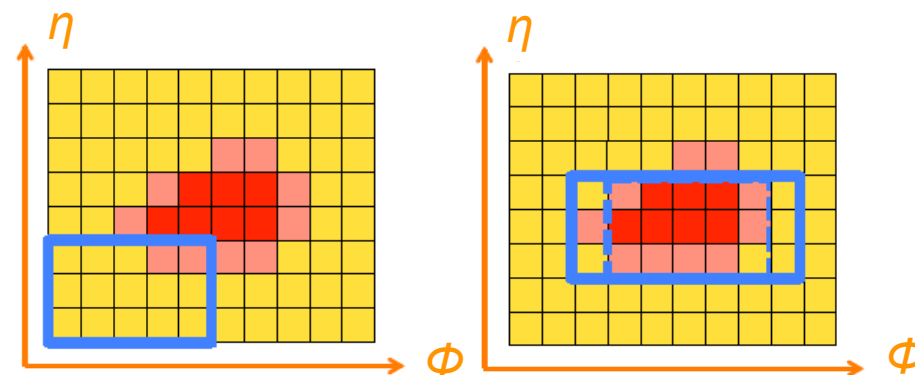


# 光子の再構成・同定

## ● 電子・光子の再構成

- EMカロリメータのクラスター  
長方形”window”をスライドさせる
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.075 \times 0.175$  (Barrel)  
 $0.125 \times 0.125$  (endcap)
- window内のenergyを足す
- 飛跡とmatchするもの → 電子  
matchしないもの → 光子

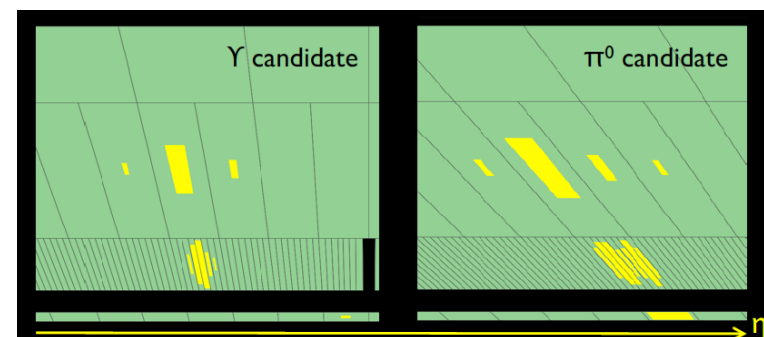
(unconverted photon)



## ● 光子の同定

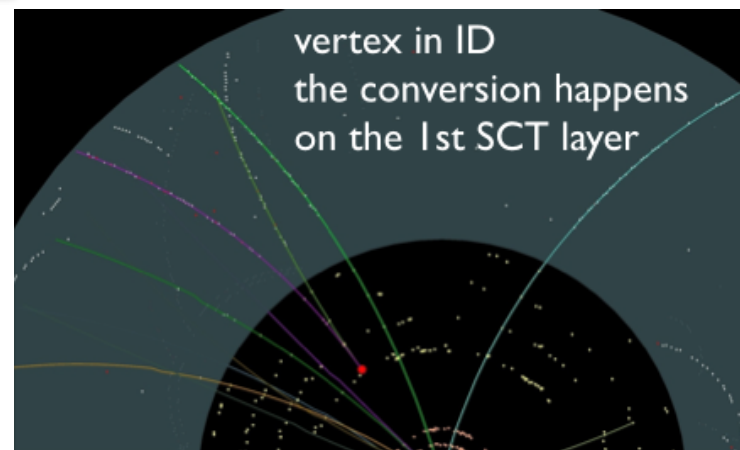
	Strips	2nd	Had.
Ratios	$f_1, f_{\text{side}}$	$R_\eta^*, R_\phi$	$R_{\text{Had.}}^*$
Widths	$w_{s,3}, w_{s,tot}$	$w_{\eta,2}^*$	Looseに使用
Shapes	$\Delta E, E_{\text{ratio}}$	* Used in PhotonLoose.	

tight に使用(定義はバックアップ)  
Eff=95% @  $E_T=200\text{GeV}$



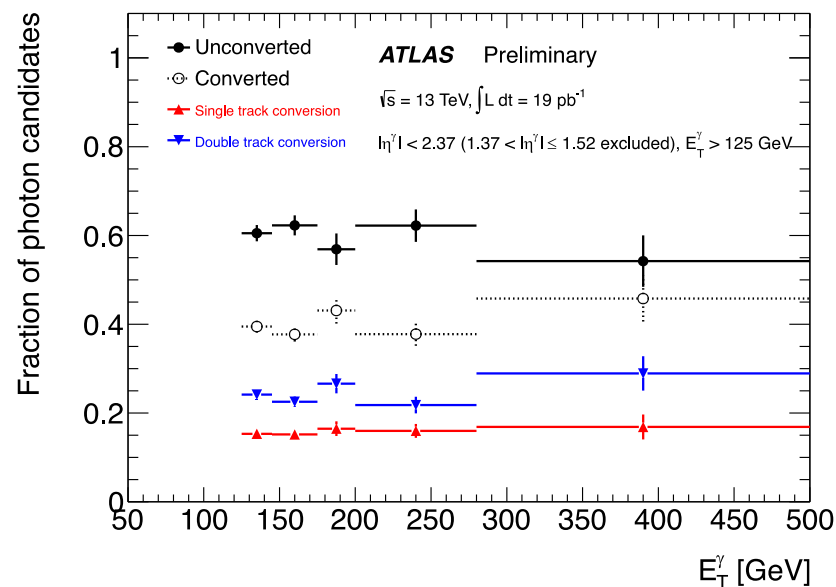
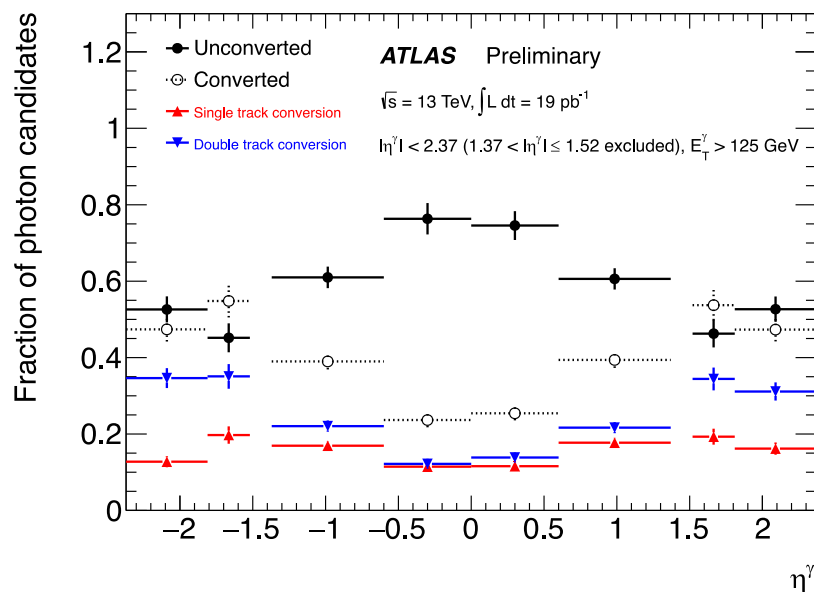
# 光子コンバージョン

- 検出器物質との相互作用： $\gamma \rightarrow e^+e^-$ 
    - 1 or 2 track(s)とEMCクラスタをマッチング
    - 2 tracksの場合：conversion vertexの存在
    - 1 trackの場合：最内層にHitがないことを要求
- これらを **converted photon** として扱う



[EGAM-2015-004](#)

- Converted photonの割合
  - $\sim 20\%$  ( $|\eta| \sim 0$ ),  $\sim 50\%$  ( $|\eta| \sim 1.6$ )





# 事象選別

## ATLAS

- 基本条件
  - 2光子トリガー(35/25GeV) eff=99%
  - 2光子同定 (tight ID)
  - Isolation (カロリメータ、トラック)
  - $\gamma\gamma$ のpurity > 90%
- モデル別
  - Spin-2 : 2光子とも  $p_T > 55\text{GeV}$

forward方向にもアクセプタンス

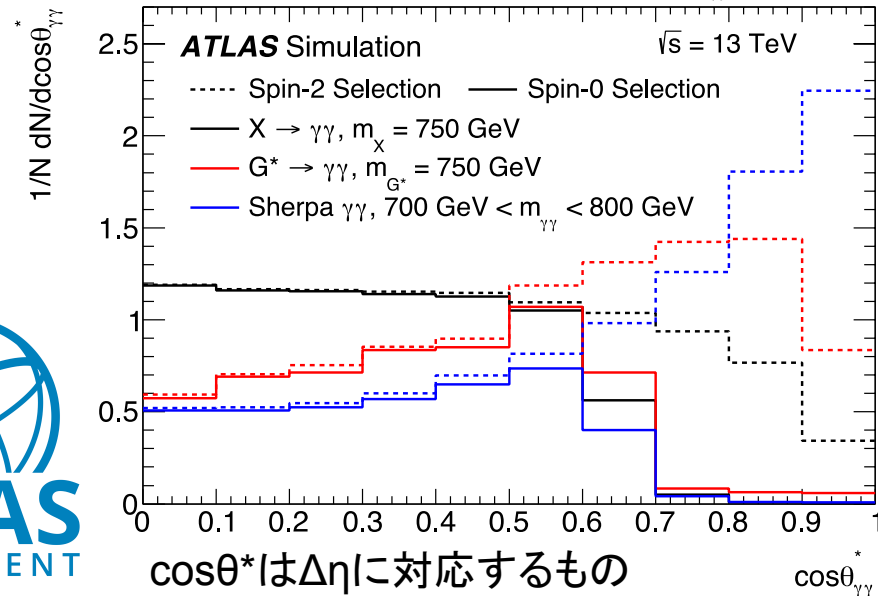
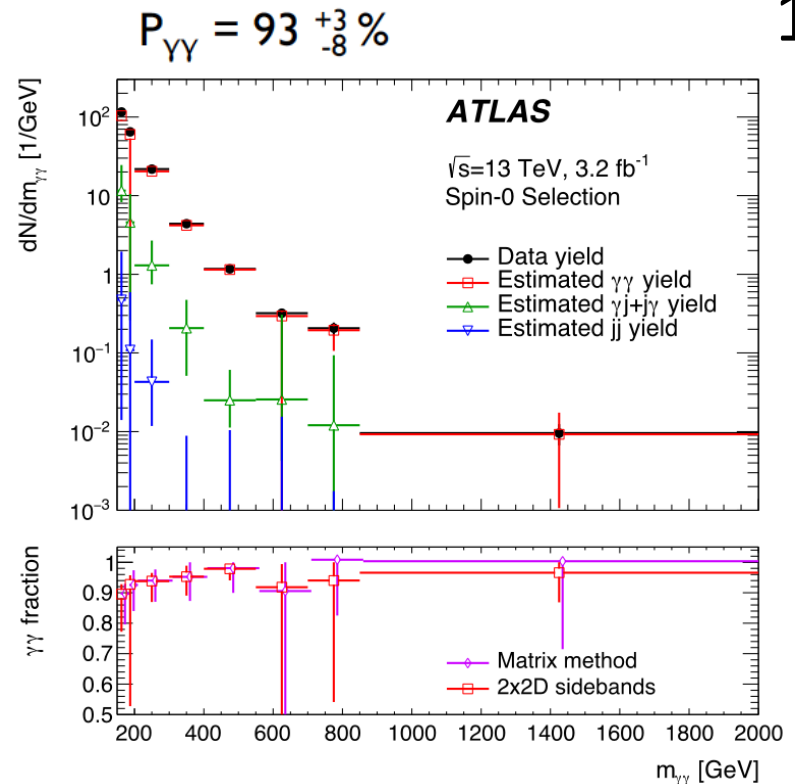
- Spin-0 :  $p_T^{(1)} > 0.4m_{\gamma\gamma}$ ,  $p_T^{(2)} > 0.3m_{\gamma\gamma}$   
central方向に重み

$m > 600\text{ GeV}$ では20%の感度向上

ICHEP2016 results

## CMS

- 2光子トリガー(60/60GeV)
- オフライン 75/75GeV
- シャワー形状、Isolation
- EB-EB ~85%, EB-EE ~80%



# 背景事象モデル

- spin-0 解析に最適化した手法

- 中間質量領域（注目している質量の両サイドバンドに十分な統計がある）を仮定
- **なめらかな形の関数を用いて、直接データへのfitで求める**

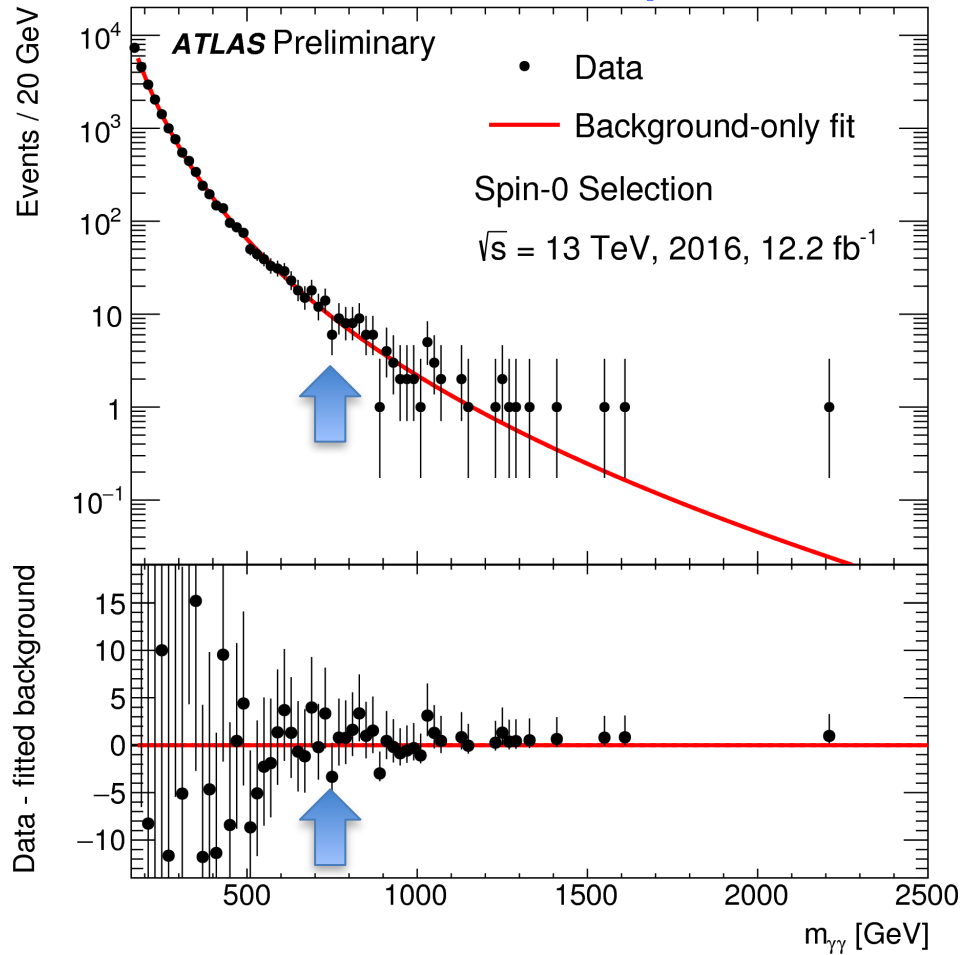
$$f_{(k)}(x; b, \{a_k\}) = N(1 - x^{1/3})^b x^{\sum_{j=0}^k a_j (\log x)^j} \quad x = \frac{m_{\gamma\gamma}}{\sqrt{s}}$$

k=0 (最低次自由度)を採用

- 系統誤差の評価・関数体系の選択に
  - A)  $\gamma\gamma$ (irreducible) : SHERPA MC
  - B)  $\gamma J + J J$  (reducible) : コントロール実験サンプルを用いる

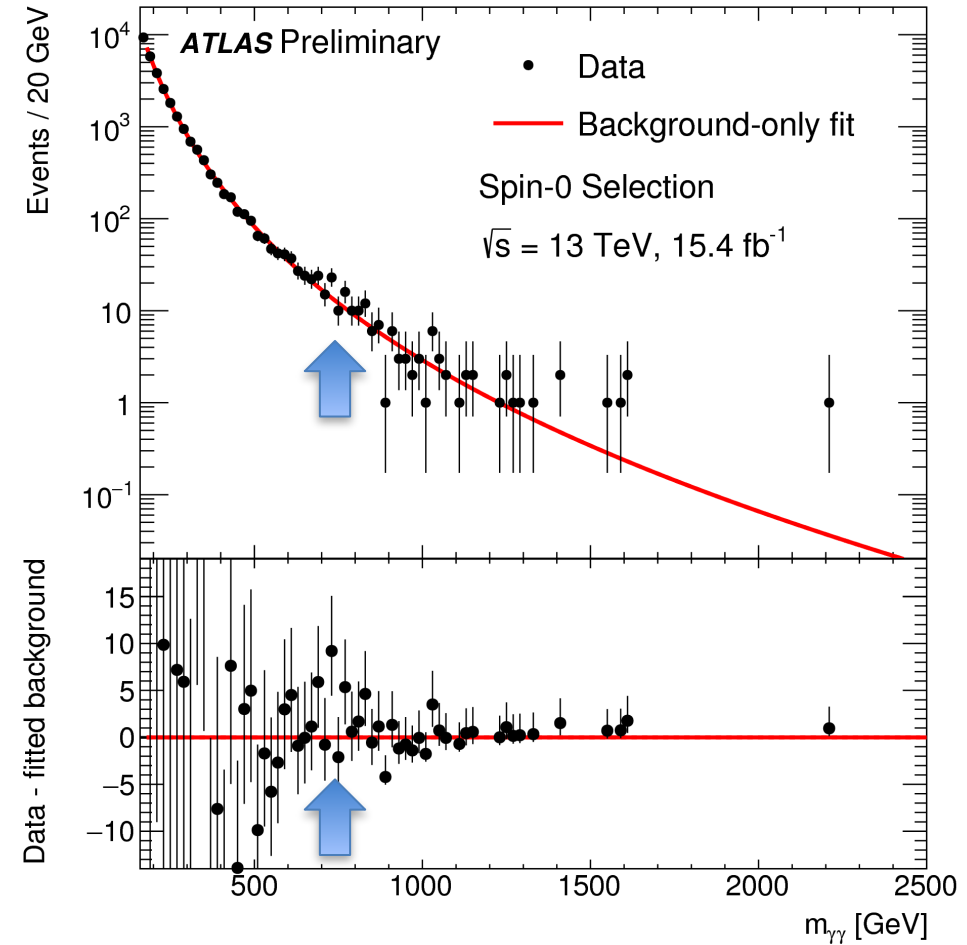


## 2016 only

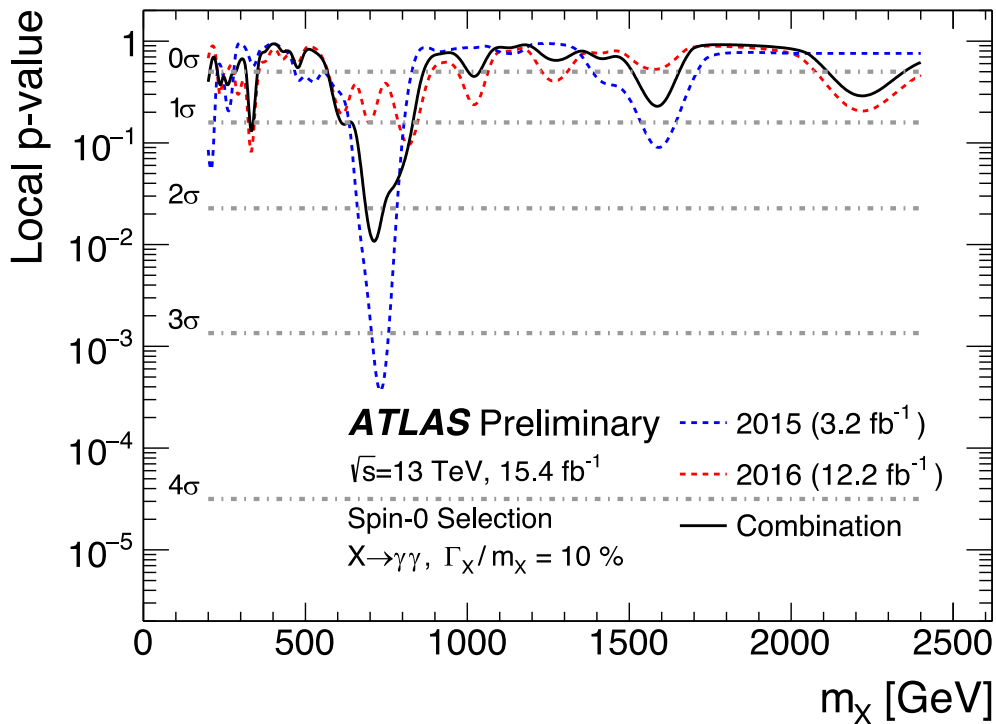


750GeV付近の超過は消えた

## 2015+2016

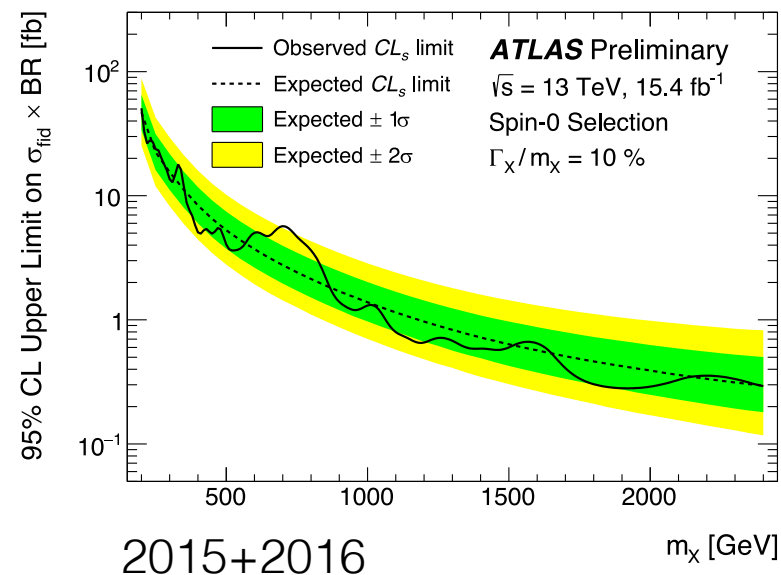
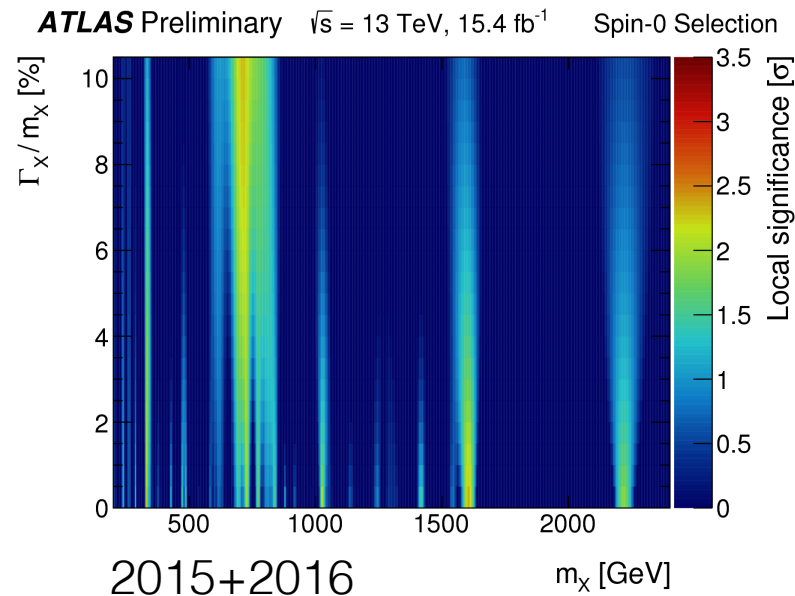


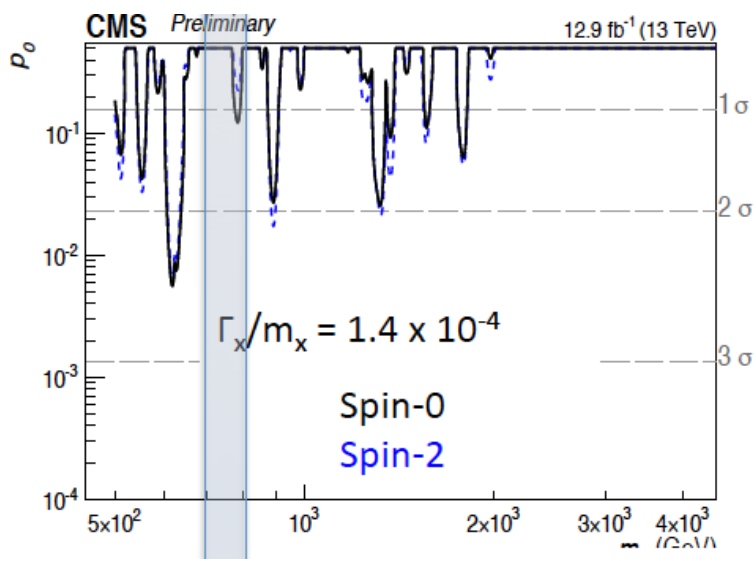
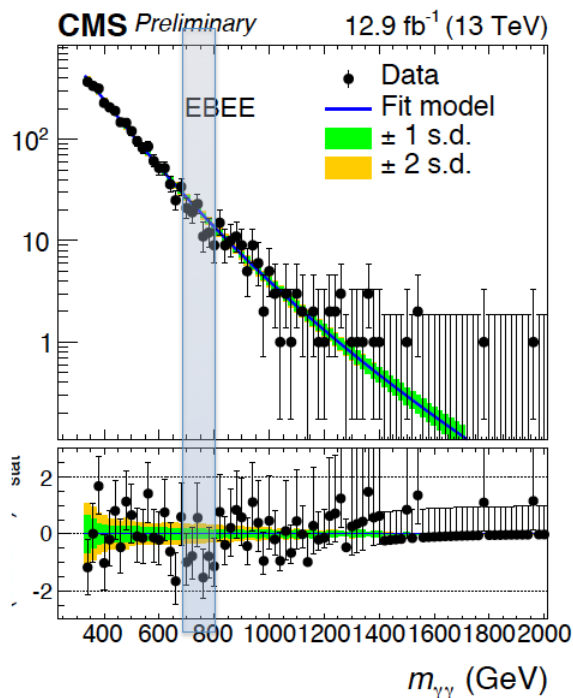
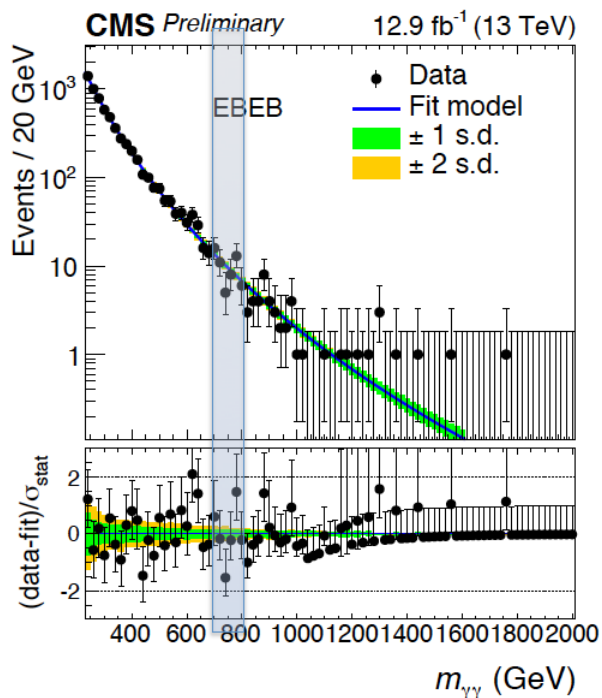
2015↔2016 結果の無矛盾度は  
 $2.7\sigma@730\text{GeV}$



Local significance:  
 2015 data :  $3.9\sigma$  (2015)  $\rightarrow$   $3.4\sigma$  (2016再解析)  
 2015+2016 :  $\rightarrow$   $2.3\sigma$  @ 710GeV (10% width)

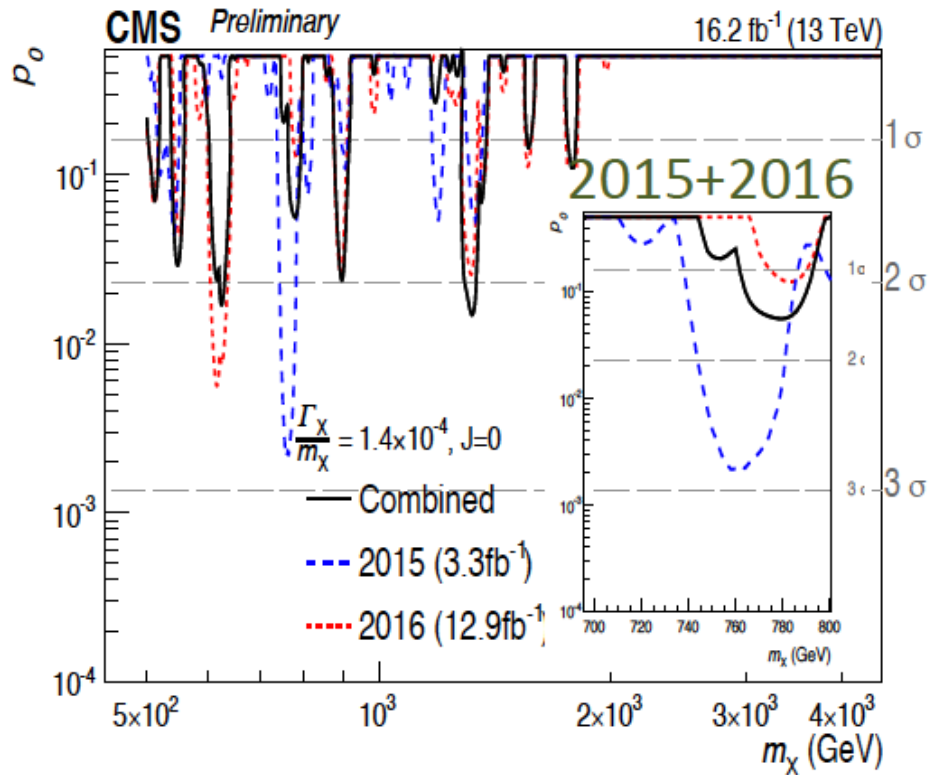
生成断面積の95%CL制限  
 (モデル依存を減らすためにfiducial 断面積を使用)





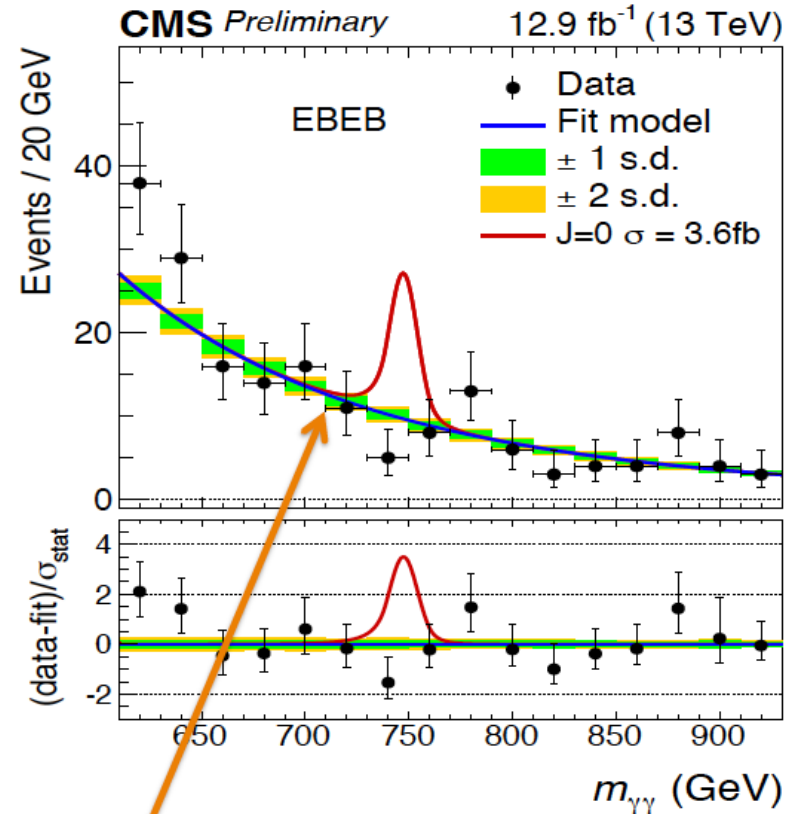
CMSでも同様に、750GeV付近にexcessなし  
 現在最大は 620GeV付近の 2.4-2.7σ

(CMSではSpin-0, spin-2の違いは  
 アクセプタンスの違いのみ:解析は同一)



Local excesses around 750GeV:

- 2015 only:  $2.9\sigma$   $\longrightarrow$  2015+2016:  $<1\sigma$
- 8TeV+2015:  $3.4\sigma$   $\longrightarrow$  8TeV+2015+2016:  $<2\sigma$

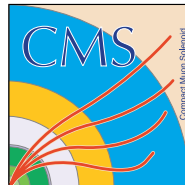


A signal with cross-section as the largest excess in 2015+8TeV would look like this

Luminosity ratioも考慮して無矛盾度を評価

Compatibility at the level of

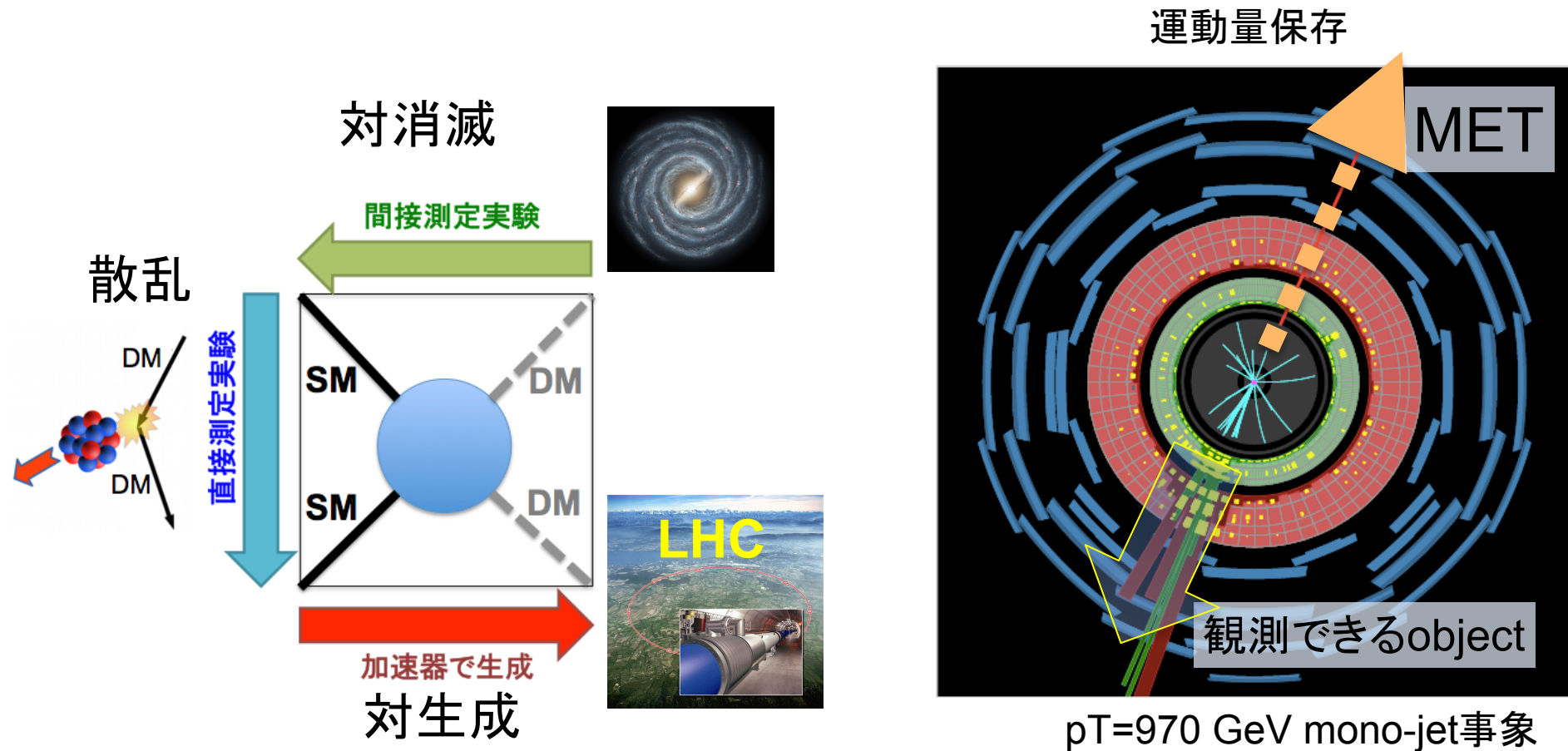
- 13TeV data only:  $2.7\sigma$
- 8TeV+13TeV data:  $2.4\sigma$



# DM 探索 at LHC

「DMはBSMではないかも知れない」という  
“可能性”を先週の研究会で知りました(汗)

# DM探索第3勢力：加速器実験

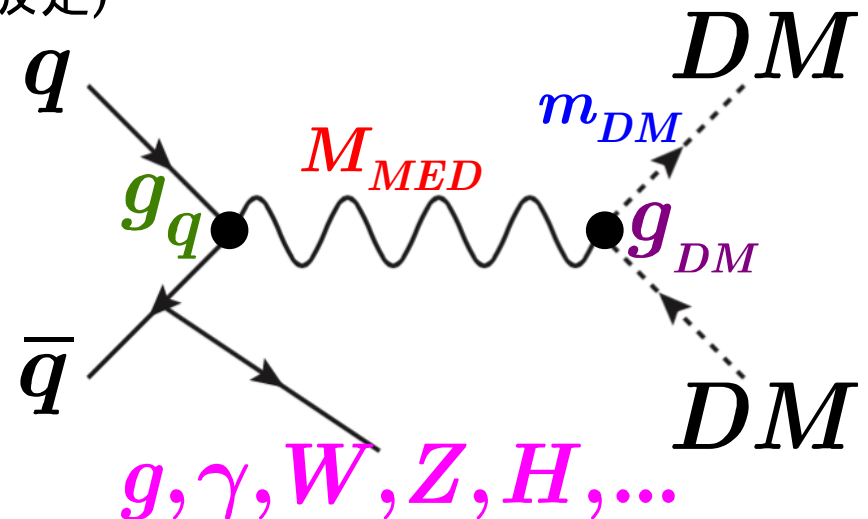


- 相補的であると同時に、独創的アプローチ
- 直接観測で見れない力学領域にも感度
  - 粒子種や特性の同定が可能

# LHC Run2 DM探索方針

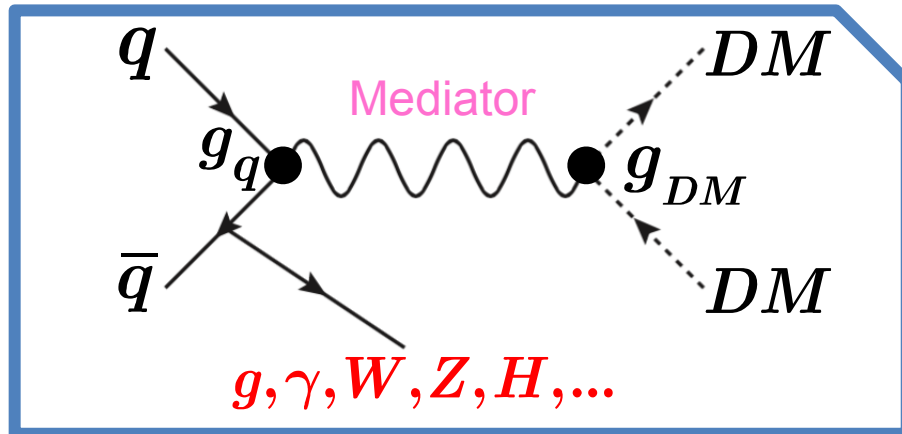
- Mediatorを使ったSimplified Modelをベースに → どの  $Q^2$ でも有効に
- LHCコミュニティ(実験、理論)で共通のフレームワーク
  - DM@LHC14 ([arXiv:1506.03116](https://arxiv.org/abs/1506.03116))
  - LHCDMWG ([arXiv:1603.04156](https://arxiv.org/abs/1603.04156), [arXiv:1507.00966](https://arxiv.org/abs/1507.00966))
- Mediatorが標準模型粒子とDMをつなぐ
- 4パラメータに帰着 ( $m_{DM}$ ,  $M_{MED}$ ,  $g_q$ ,  $g_{DM}$ )
- $m_{DM}$  vs.  $M_{MED}$  平面で議論 (結合定数は仮定)

Mediator Type	$g_{DM}$	$g_q$
Vector	1	0.25
Axial-Vector	1	0.25
Scalar	1	1
Pseudo Scalar	1	1

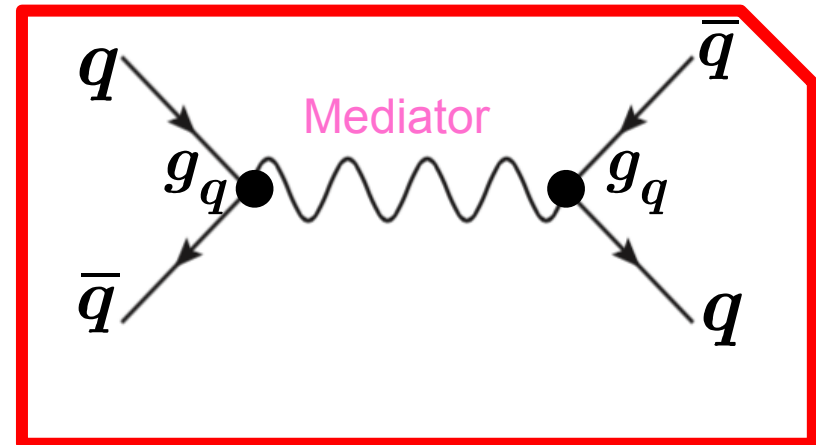


# LHCでのDM signature

## Mono-X + MET

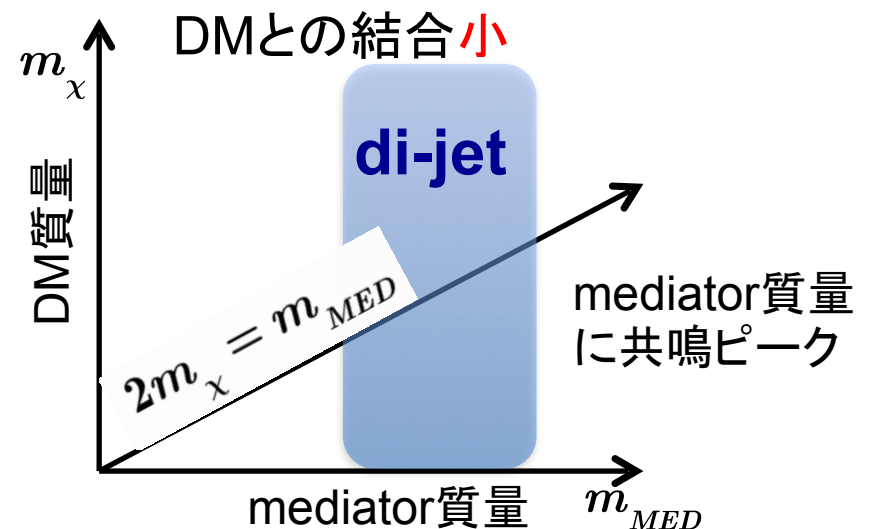
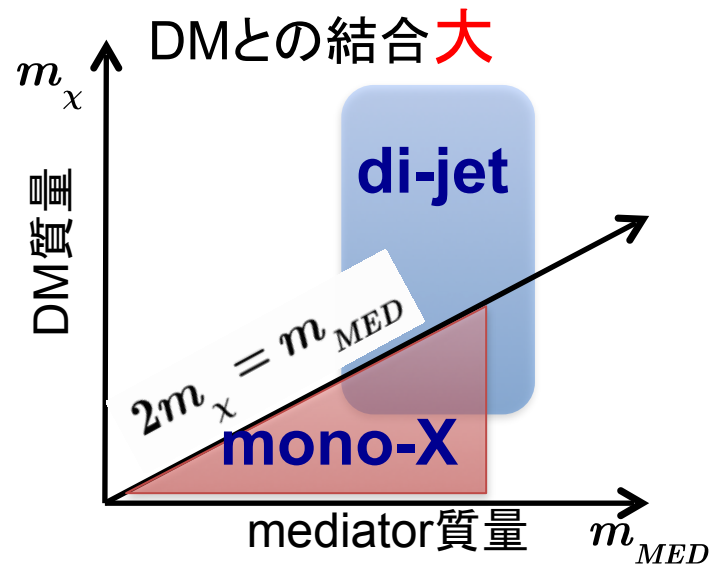


## Di-Jets



Mediatorを介する → より一般的なフレームワーク

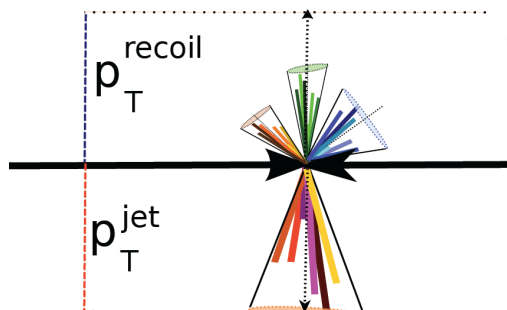
mono-X and di-jet が相補的な関係に [arXiv:1503.05916](https://arxiv.org/abs/1503.05916)



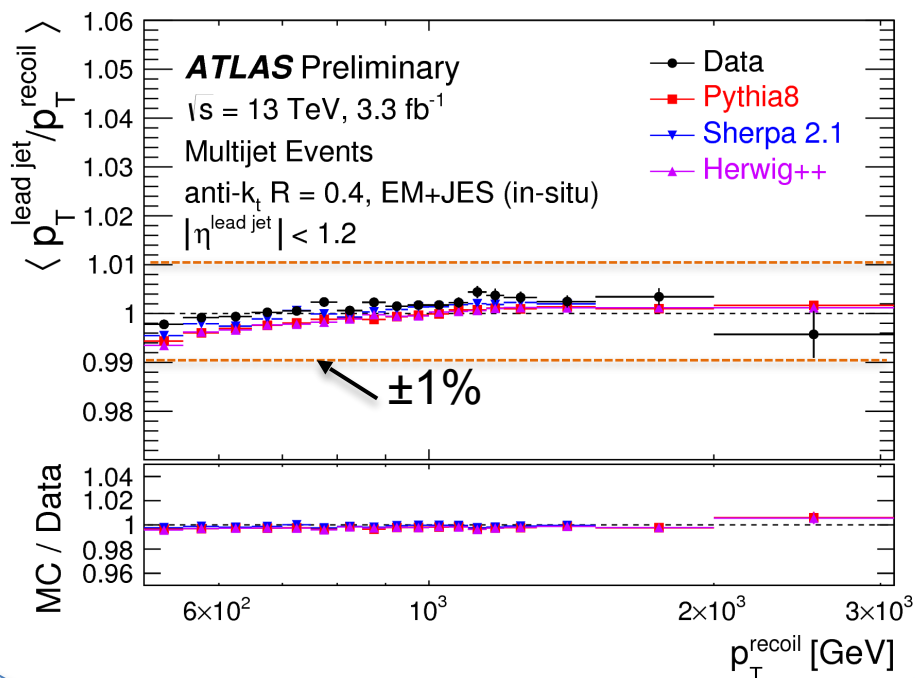


# TeV 領域での Jet / MET の性能

Jetのエネルギー較正は数TeVまで有効



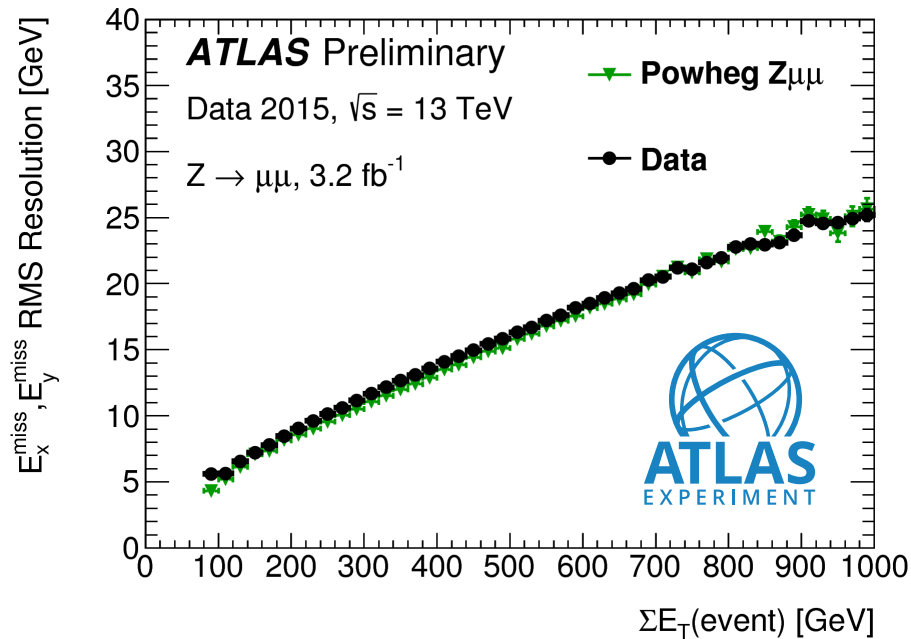
JETM-2015-003



Missing ET も十分な理解  
 METの基本的な分解能を $Z \rightarrow \mu\mu$ で評価

CST MET

JETM-2016-003



# **DM production Mono-Jet + MET**

# Mono-Jet + MET

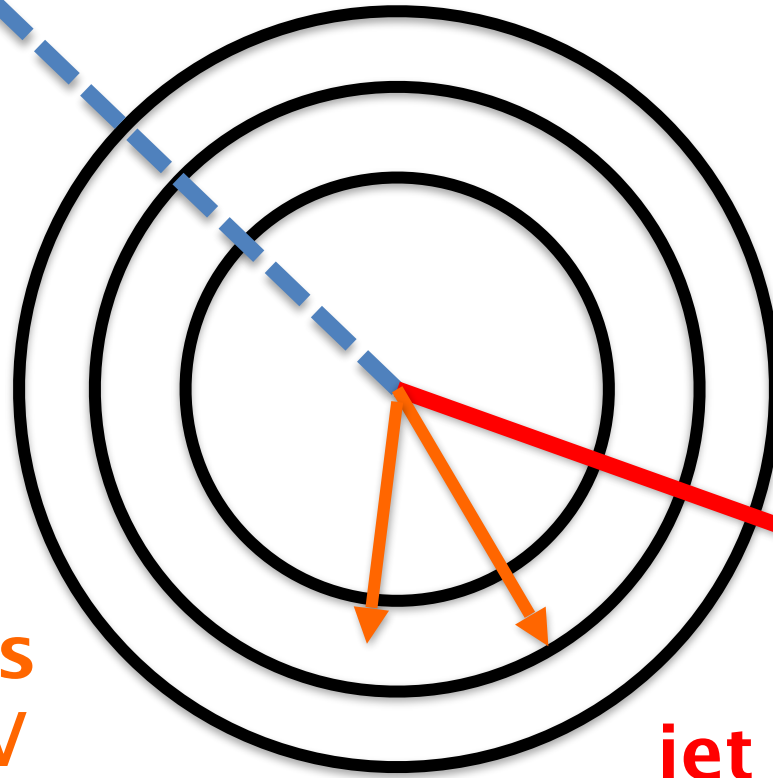
信号領域

$\text{MET} > 250 \text{ GeV}$

$\Delta\Phi$  btw MET &  
jets  $> 0.4$   
e &  $\mu$  veto

allow up to 3 jets  
with  $p_T > 30 \text{ GeV}$

jet  $p_T > 250 \text{ GeV}$   
 $|\eta| < 2.4$



# Mono-jet 探索 (13 TeV)



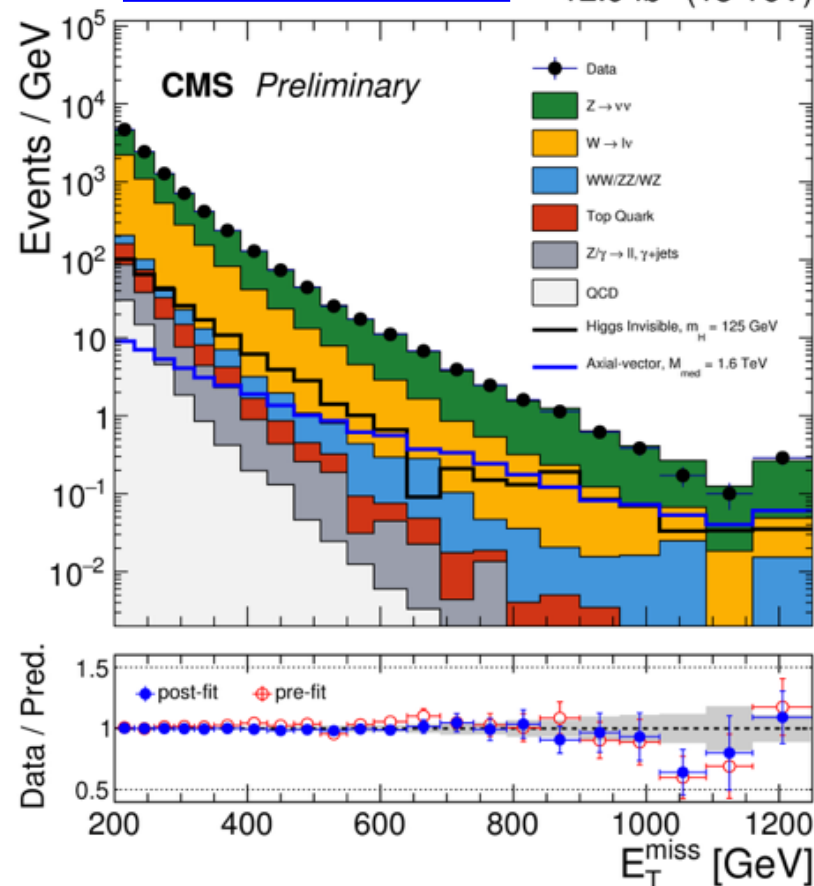
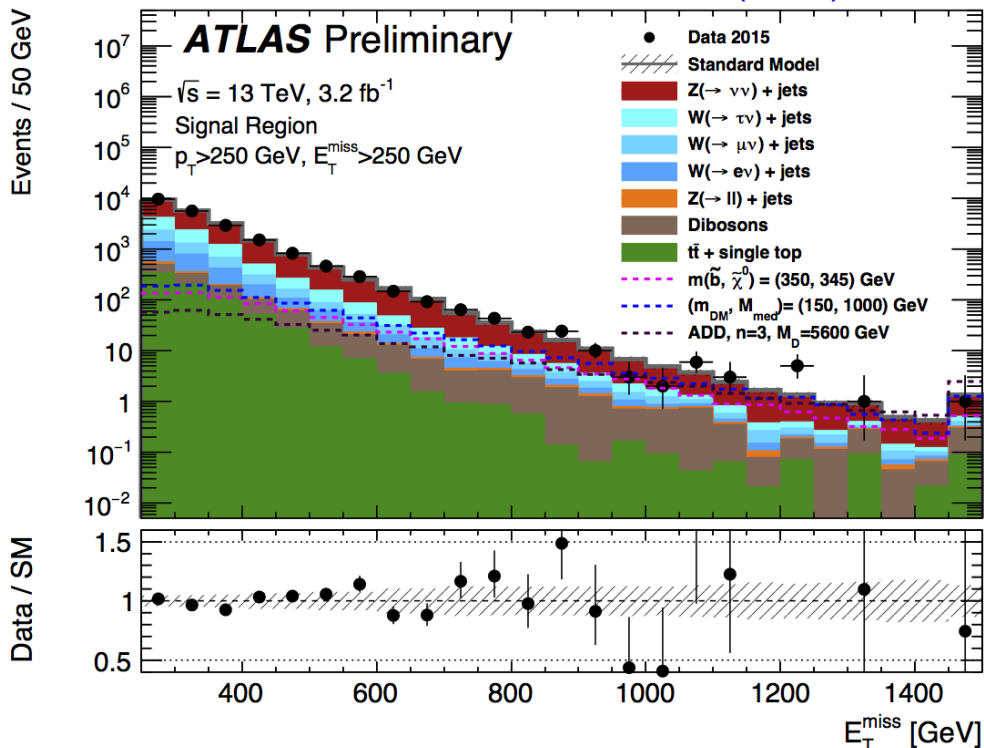
LHCでは最大の X +MET 断面積 ( $\alpha_{\text{QCD}}$  大)



[PRD94\(2016\)032005](#)

[CMS-PAS-EXO-16-037](#)

12.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)

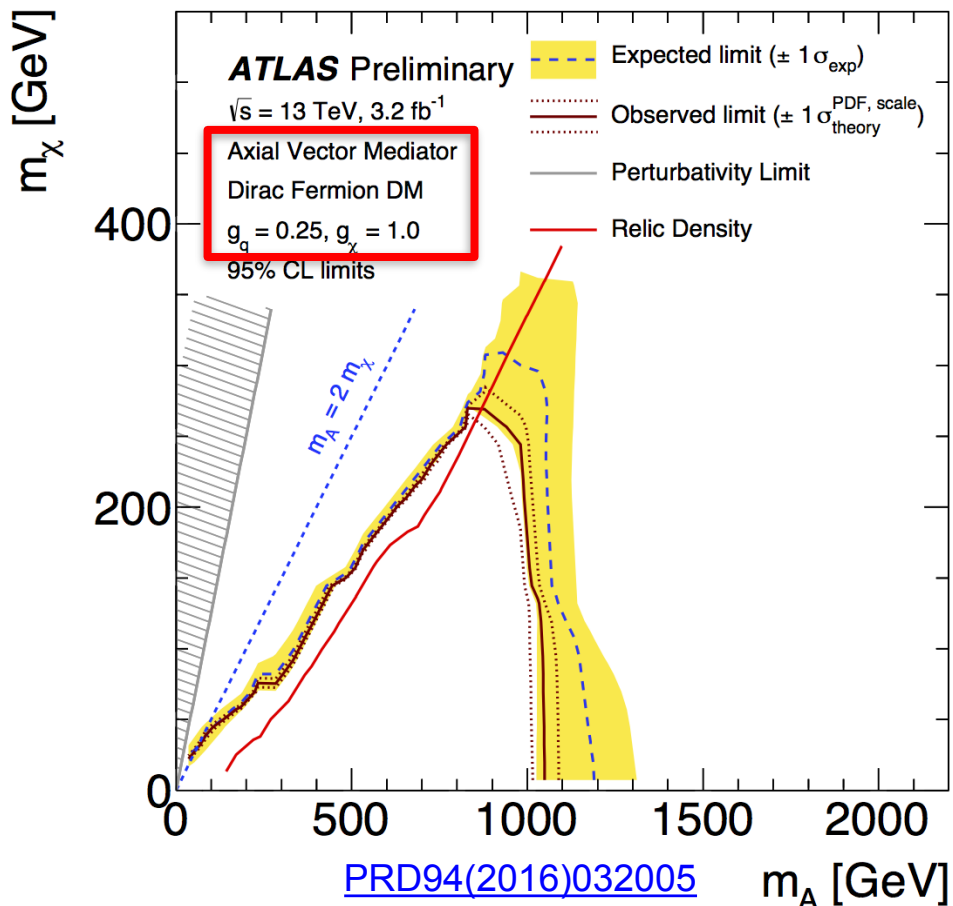


## ●バックグラウンド

- Z $\rightarrow \nu\nu$  + jets が irreducible  
(Z $\rightarrow ll$ , W $\rightarrow l\nu$ を使ってモデリング)
- 非衝突事象由来のBKGはデータ自身で評価

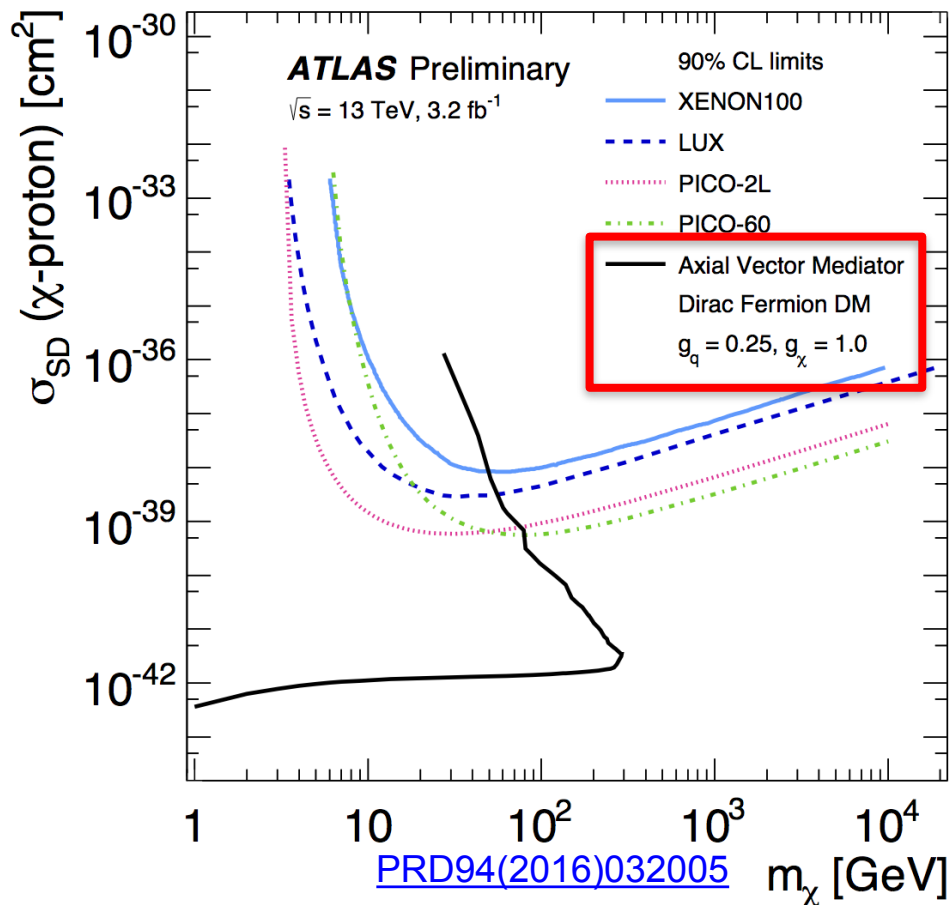


## Simplifiedモデルへの制限



Axial vector mediator (結合定数は固定)  
 Mediator質量の1TeV以下を棄却  
 (CMS-EXO-16-037では2.0TeV付近まで)

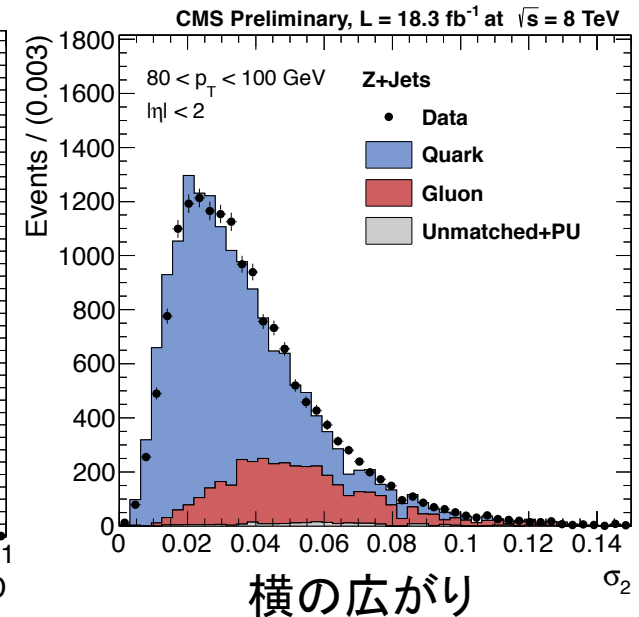
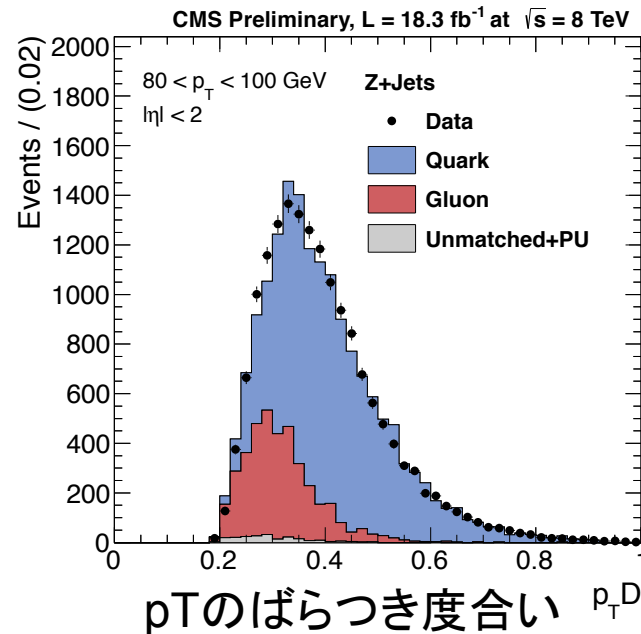
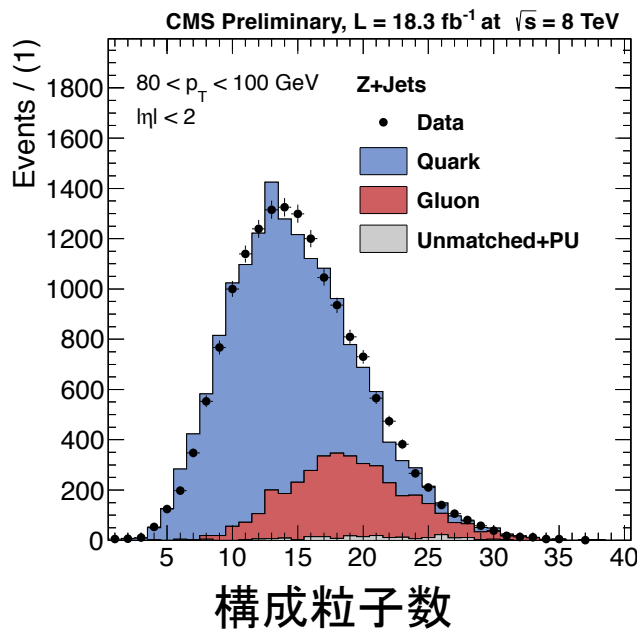
## 直接観測との比較



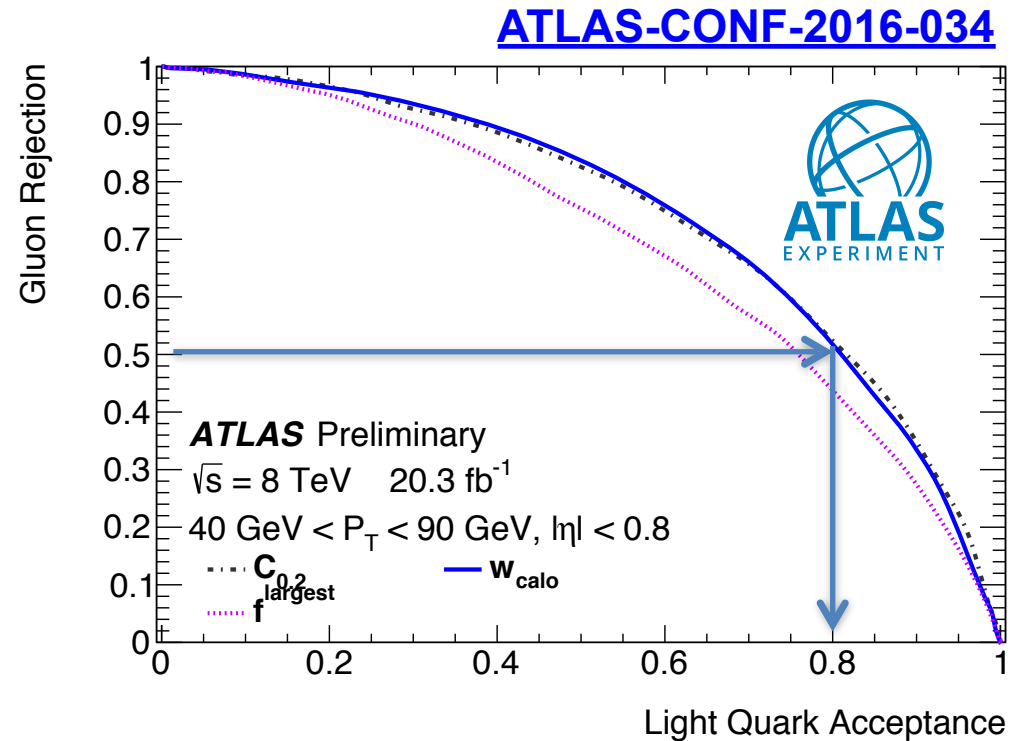
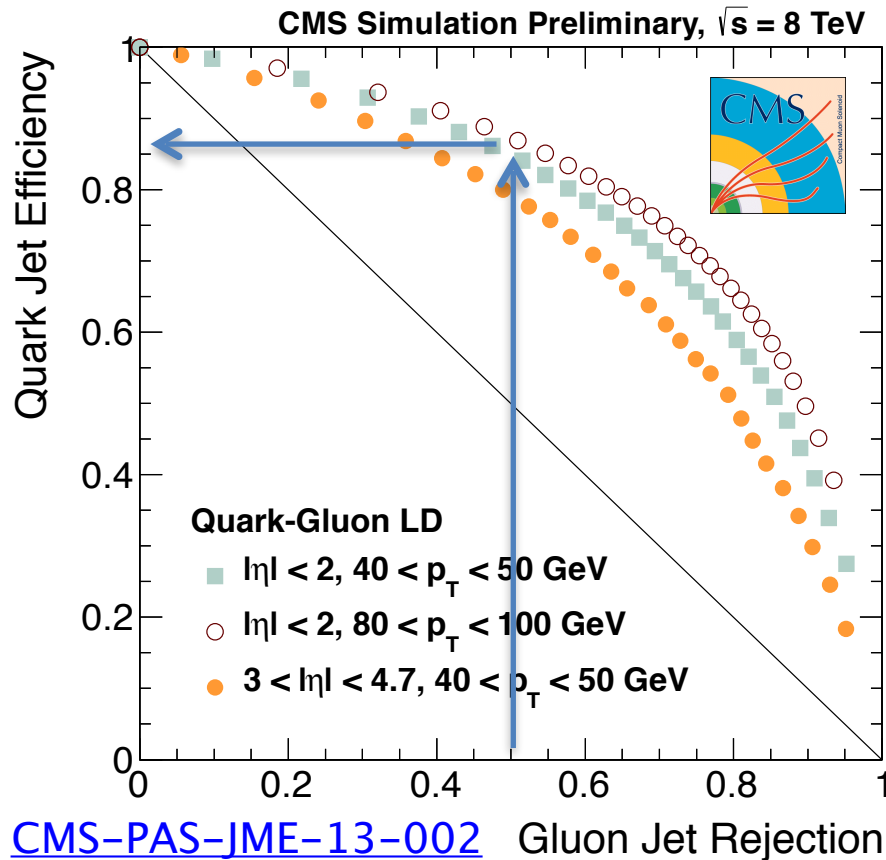
WIMP-原子核衝突断面積で  
 $10^{-42} \text{ cm}^2$  は棄却  
 (CMS-EXO-16-037は $10^{-43} \text{ cm}^2$ まで)

# JET (Quark/Gluon) 識別

- 1<sup>st</sup> leading jetを見ると
  - Signal Q:G ~ 1:2
  - BG (主にZ+jets) Q:G ~ 5:1
- Tagging能力向上 → S/N改善
- CMS ([CMS-PAS-JME-13-002](#))
  - gluon : color大 → shower多 → 粒子多、pT少なめ、太め
  - 識別能力の高い3変数を用いた多変量解析



# JET (Quark/Gluon) 識別 (2)



ATLASは1変数での性能しか見せていない  
 (現在、改善に向けて取組中)

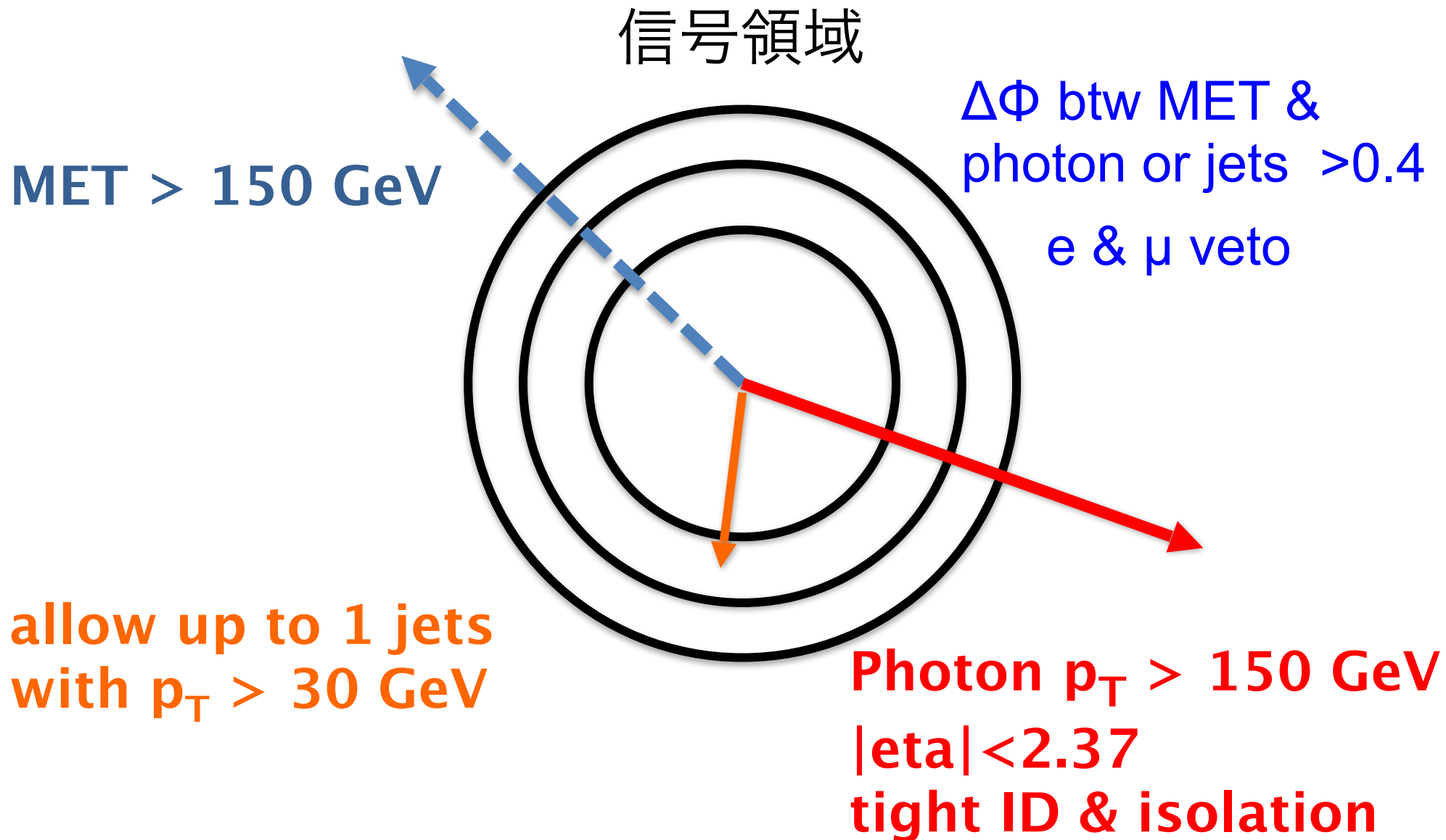
- 例えば gluon-jetを50%効率で CMS (ATLAS) では85% (80%) light-jetを落とせる
- (注意:  $p_T$ ,  $\eta$ の領域に強く依存)

# DM Productions Mono-X's

X=Jet (統計的優位)以外をいまやる意義:  
XがISRとは限らない



# Mono-photon + MET

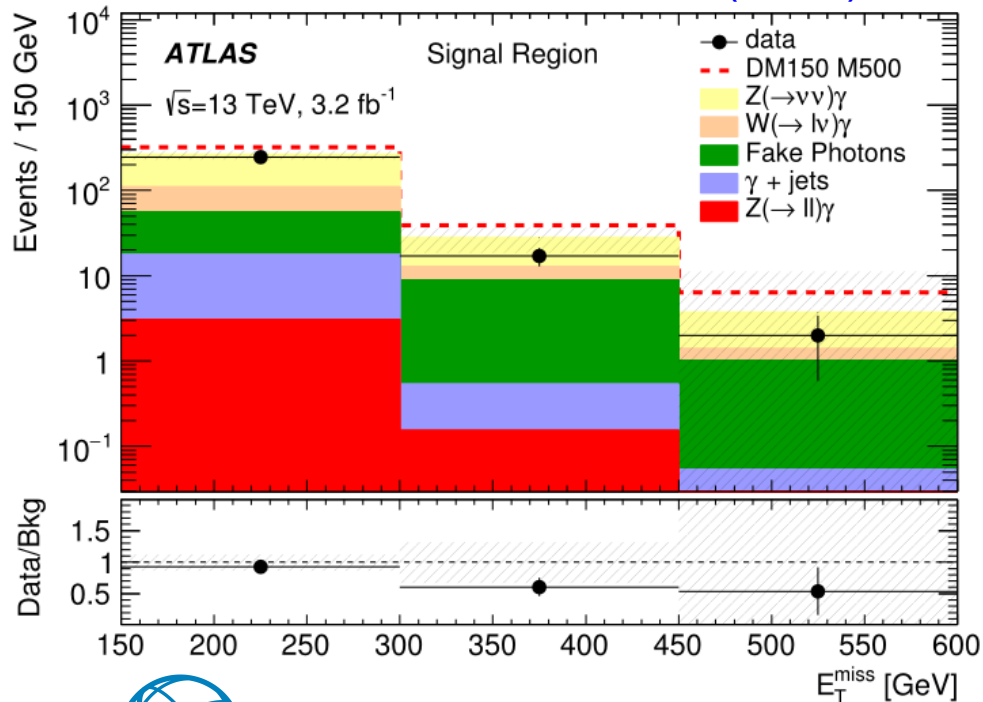


# Mono-photon探索 (13 TeV)

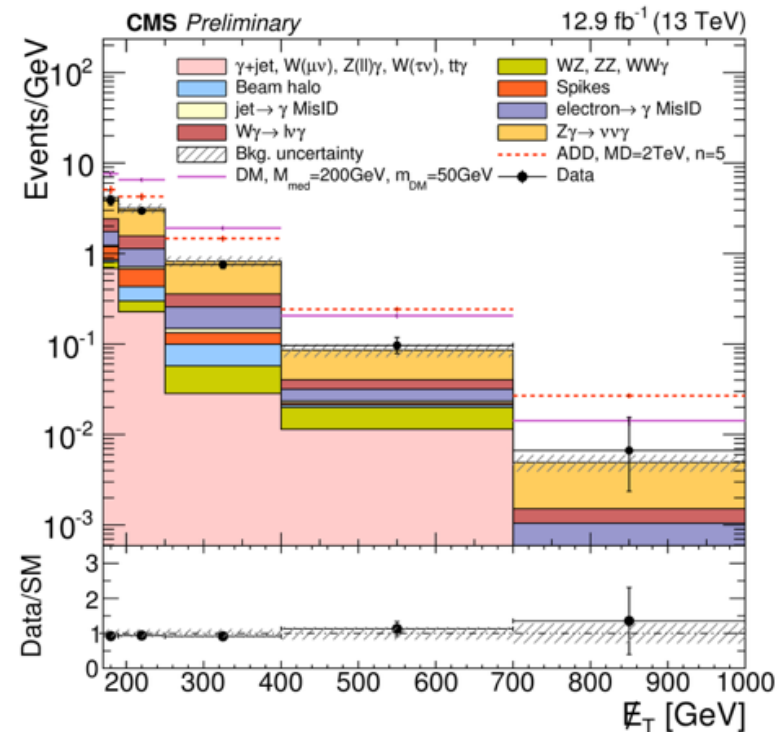
mono-jetに比べて、綺麗な信号  
断面積が大幅に減少→少統計量  
主なバックグラウンド  $V+\gamma$

- Background (control region)
  - $Z(\rightarrow \nu\nu)+\gamma$  (2e, 2 $\mu$  CR) Irreducible
  - $W(\rightarrow \ell \nu)+\gamma$  (1 $\mu$  CR)
  - $\gamma$ +jets ( $\gamma$ +jets lower MET CR)

[JHEP06\(2016\)059](#)



[CMS-PAS-EXO-16-039](#)

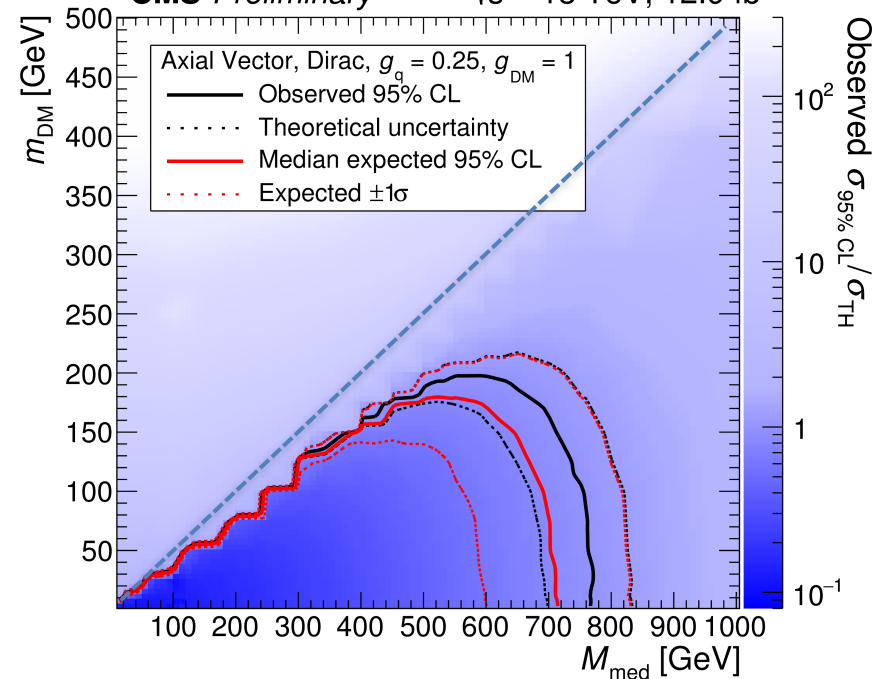
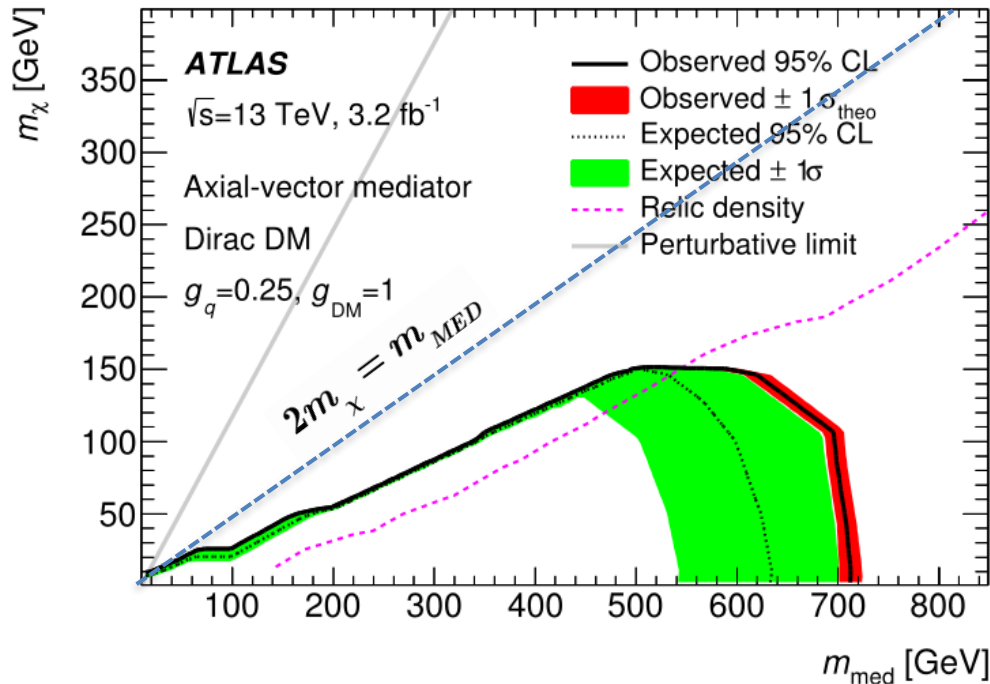


両実験共に超過なし

# Mono-photon 結果・解釈 (13 TeV)



CMS Preliminary  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 12.9 \text{ fb}^{-1}$

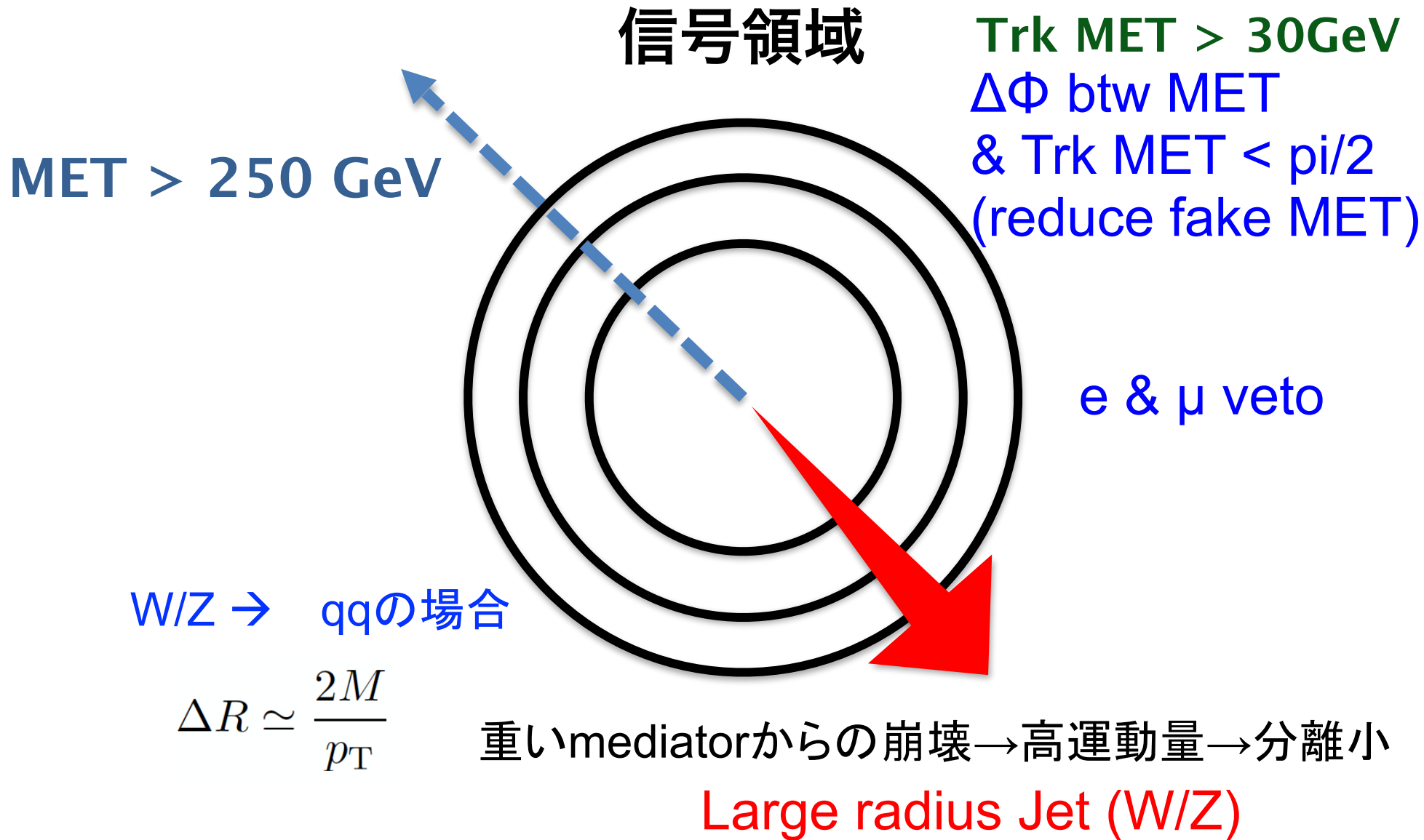


DM simplified モデルへの制限:

Axial vector mediator (結合定数固定)

ATLAS (CMS) : Mediator 質量 0.70(0.76) TeV以下を棄却

# Mono-W/Z + MET



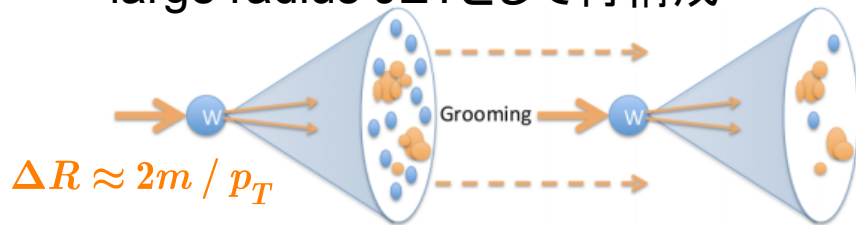
# Boostされたobjectの識別

## Boosted W/Z tagging

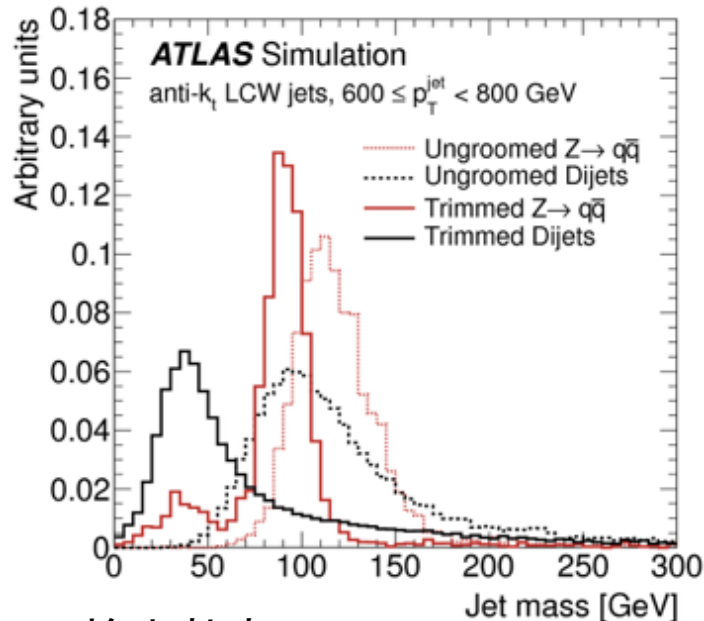


## Boosted H tagging

large radius JETとして再構成



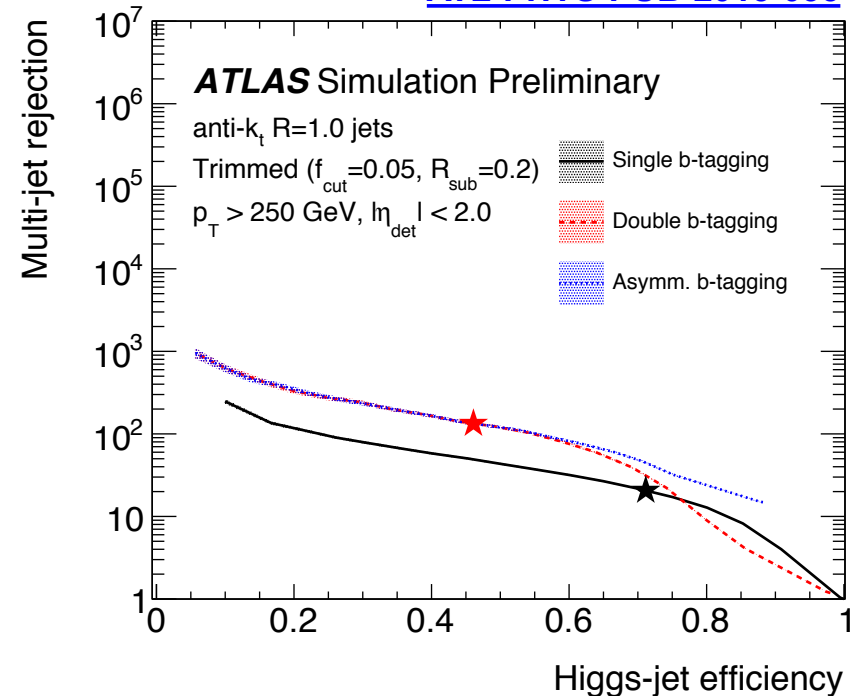
- ソフトな成分を取り除く(5%未満のもの)
- 2-prongらしさを要求 [JHEP09\(2013\)076](#)



50% 検出効率  
~50 BG rejection factor ( $p_T > 200$  GeV)

2x b-tagging, jet質量, 内部構造

[ATL-PHYS-PUB-2015-035](#)



緩い選別条件では

40% 検出効率

~250 rejection for inclusive multi-jets

~70 rejection for hadronic top

# Mono-Z/W 探索(13 TeV)

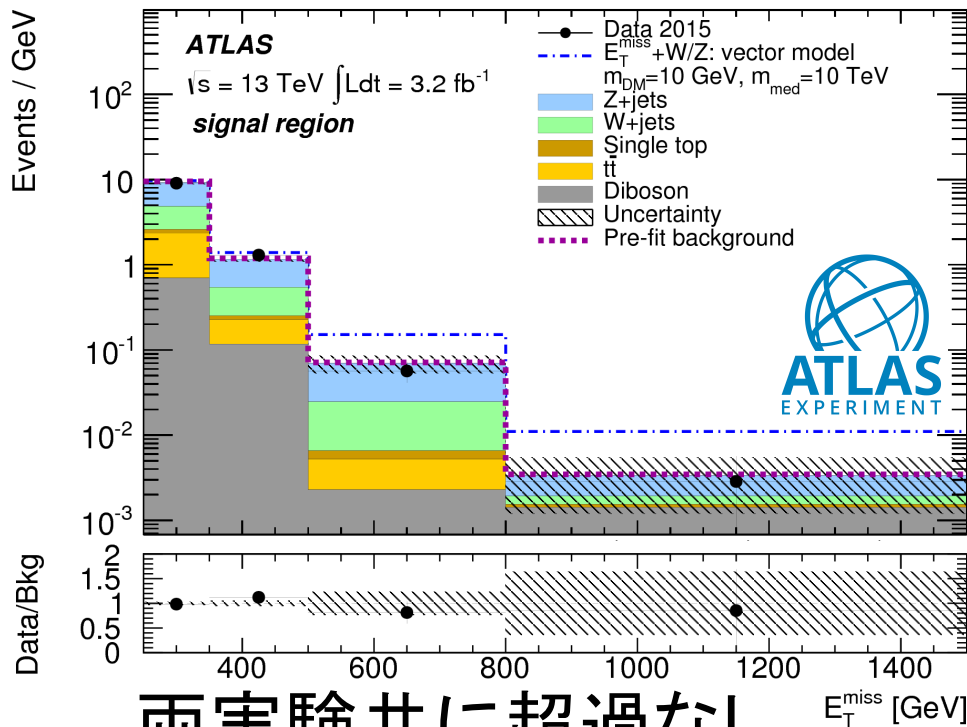
Mono-W/Z のハドロン崩壊(Large Jet)を使う  
最大の系統誤差は Large Jet由来(~10%)

断面積的にお得

$$\text{BR}(W \rightarrow qq) \approx 3 \times \text{BR}(W \rightarrow \ell\nu)$$

$$\text{BR}(Z \rightarrow qq) \approx 10 \times \text{BR}(Z \rightarrow \ell\ell)$$

[arXiv: 1608.02372](https://arxiv.org/abs/1608.02372)

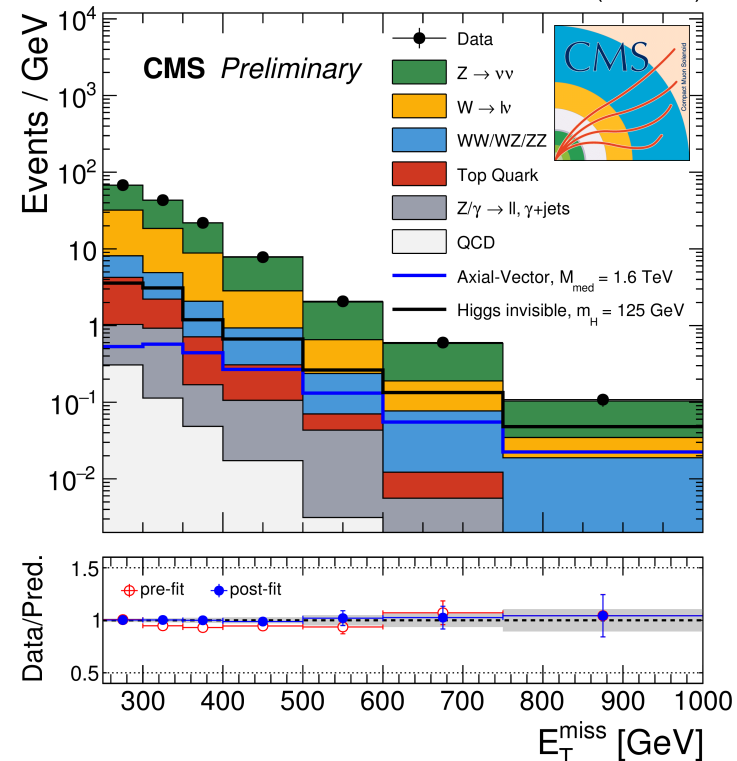


両実験共に超過なし

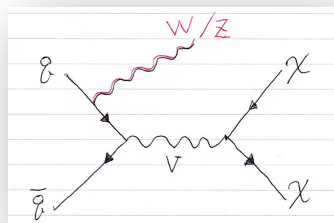
- バックグラウンド (CR)
    - Z+jets (2 muon)
    - W+jets (1 muon & no b-jet)
    - ttbar (1 muon & 1 b-jet)
- 3規格因子同時フィットでも求める

[CMS-EXO-16-037](https://arxiv.org/abs/1608.02372)

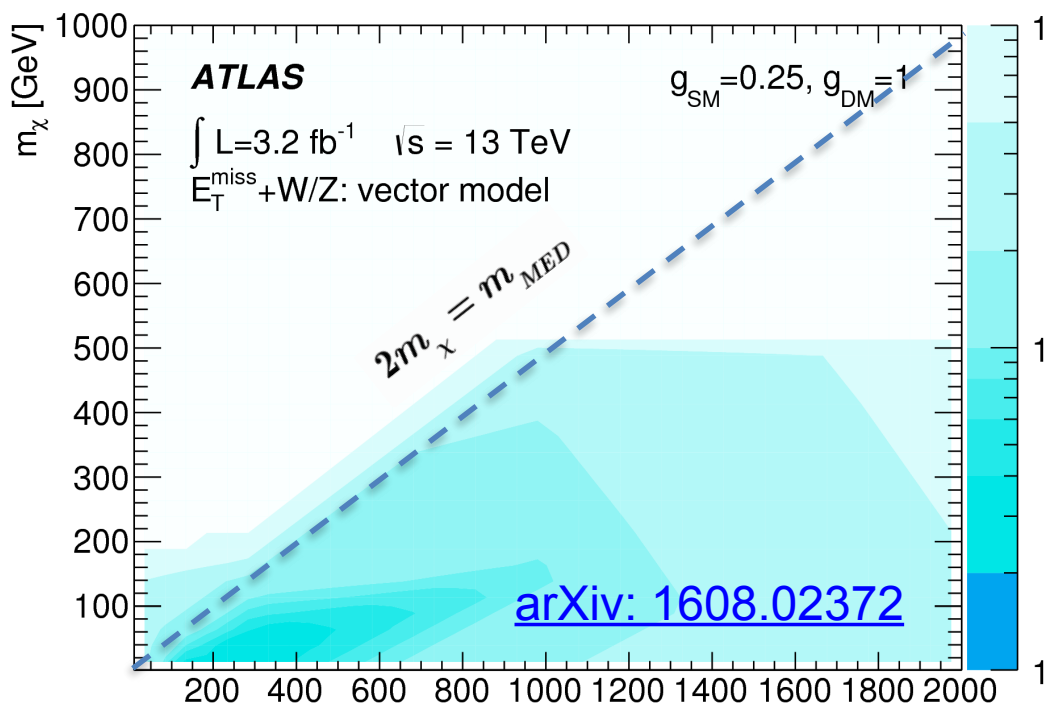
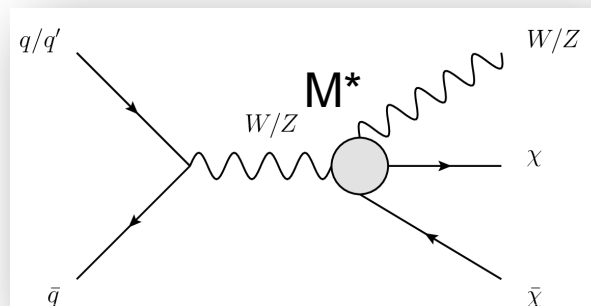
12.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



# mono-Z/W 結果・解釈 (13 TeV)

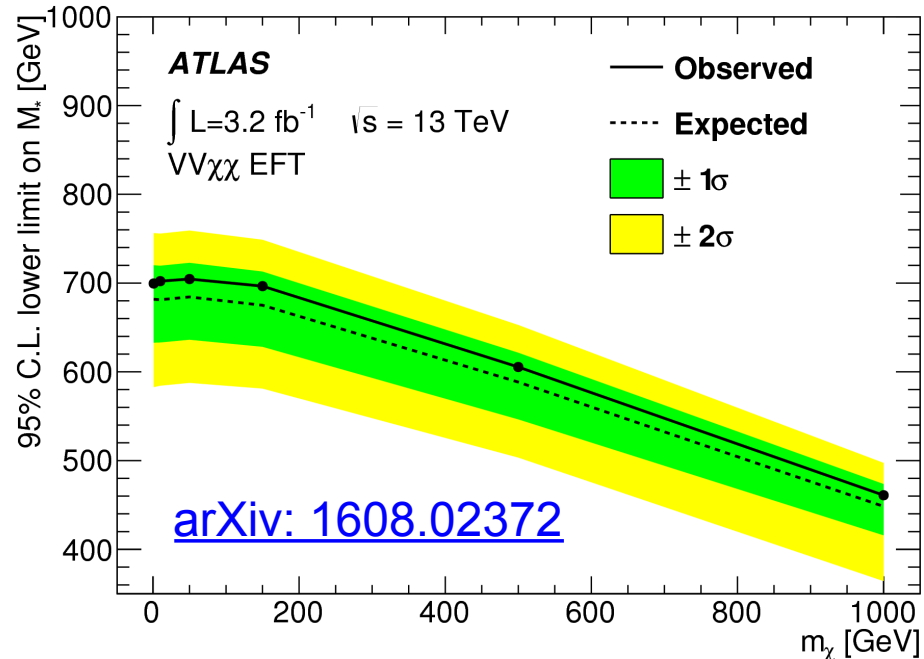


Simplified model (vector mediator)  
信号強度に関するリミット



CL95で棄却する領域はまだなし  $m_{med}$  [GeV]  
(CMSはmono-jetとcombineしている  
ので、mono-V単体の結果はなし)

VV $\chi\chi$  4点結合EFTで解釈(DMと直接結合)



Mono-Z ( $\rightarrow \gamma\gamma$ ) も 2016データで結果あり  
両実験とも超過なし



# Di-jet 生成を用いた DM探索

$M=7.5$  TeV



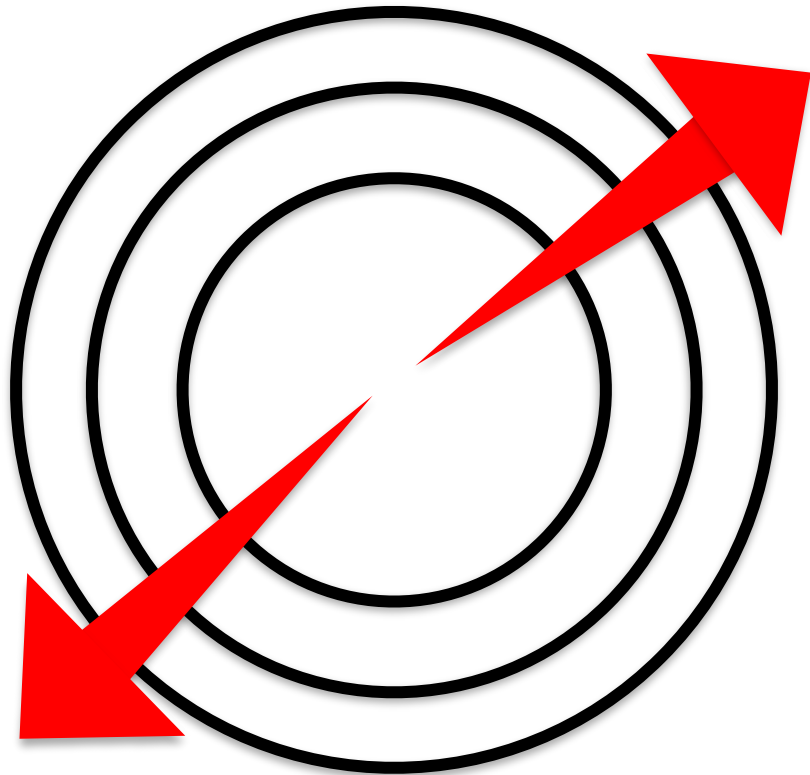
Run: 302347

Event: 753275626

2016-06-18 18:41:48 CEST



# Di-jet 探索



## [1] DM探索の他に様々なBSM予言

- QBH
- KK Graviton
- Excited quark

もっとも感度が高く、最速で  
高質量領域を探索できるチャンネル

## [2] 低質量領域 & 低断面積信号

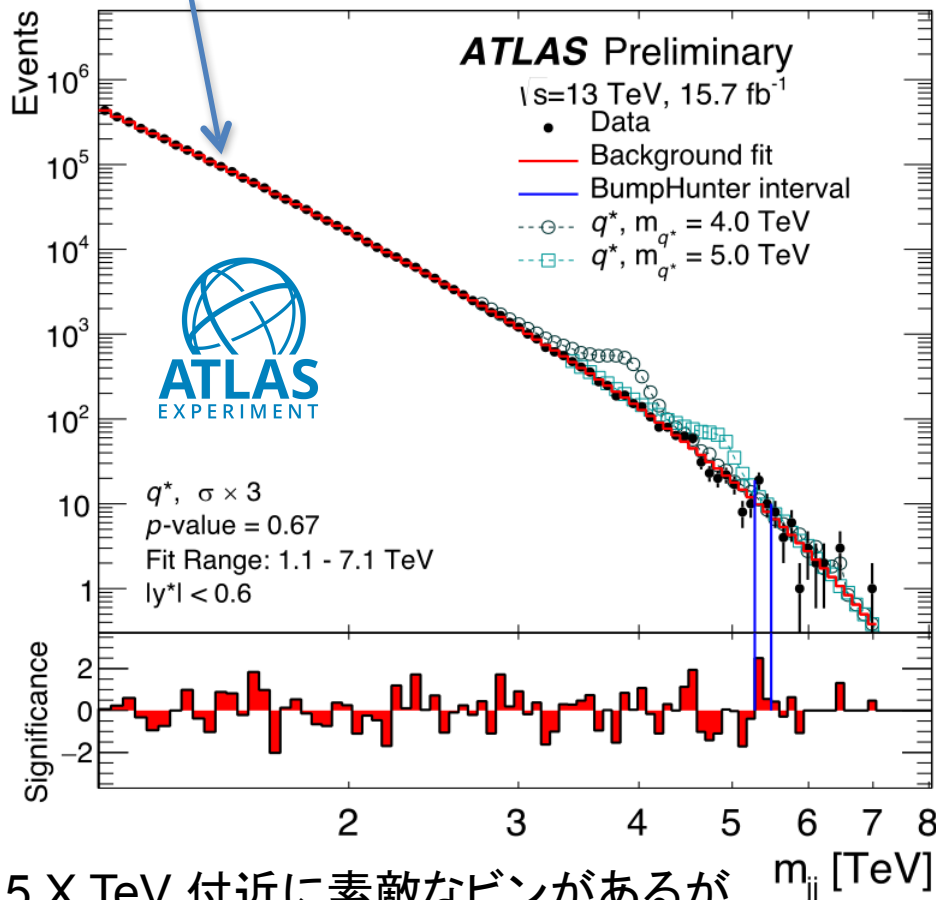
- ISRを使った解析
- Data Scoutingを用いた解析

# Di-jet 質量分布 (13 TeV)

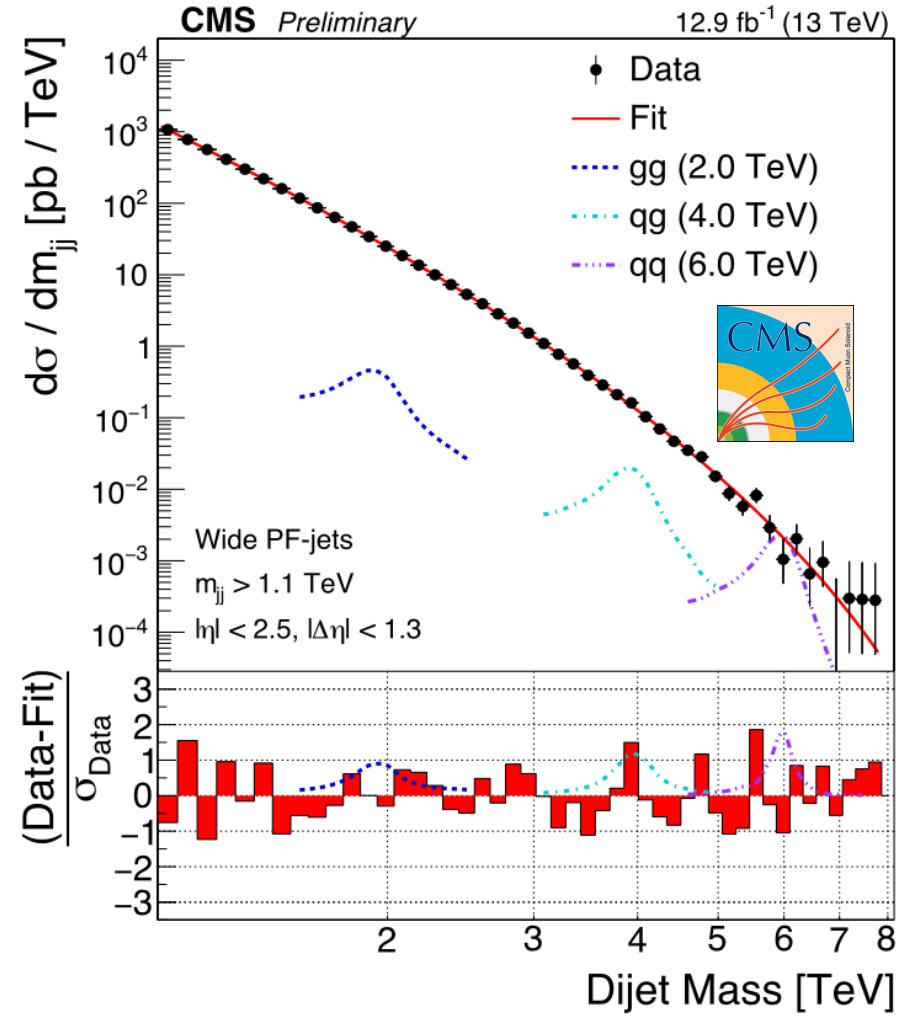
Single jet trigger (380 GeV) → Offline Jet  $p_T$  cut (440 GeV)

[CMS-PAS-EXO-16-032](#)

QCD backgrounds [ATLAS-CONF-2016-069](#)



5.X TeV 付近に素敵なビンがあるが  
ジェットのエネルギー分解能を考慮すると、  
信号分布のようにブロードになるはず  
(2% at 5 TeV)



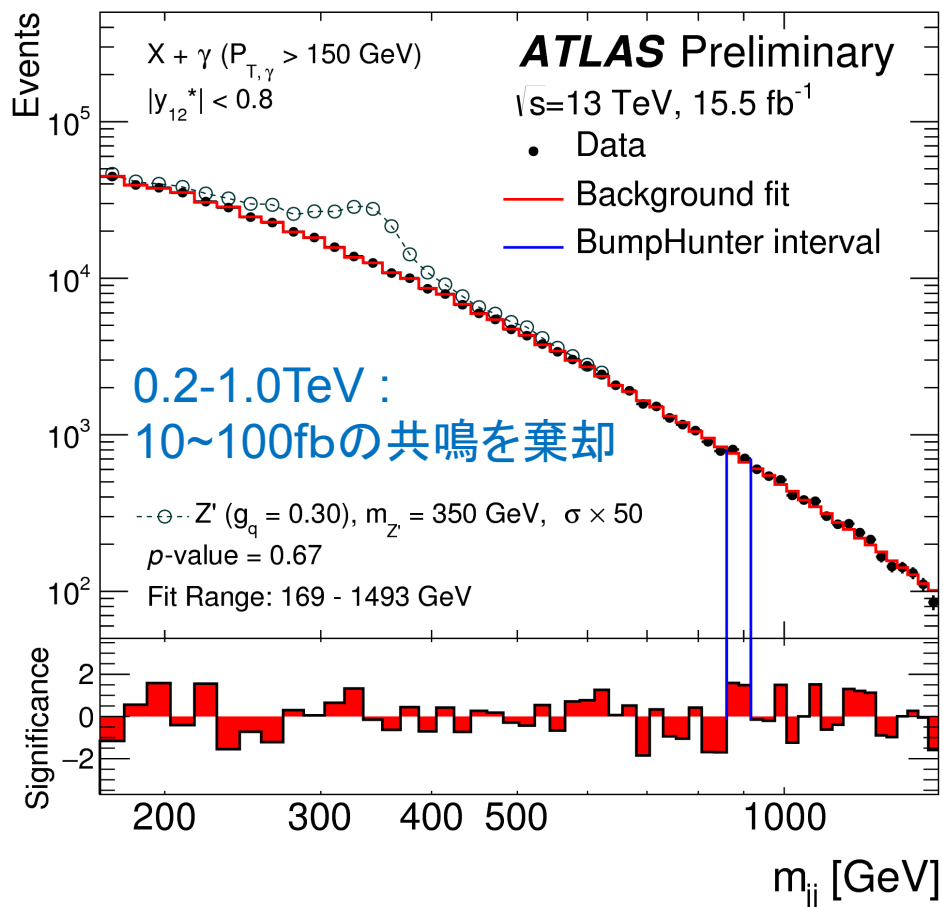
統計的に有意なピークはなし  
2jet間の角度分布も新物理に感度→逸脱なし

# Di-Jet + ISR 解析：低質量領域

DM/Mediatorが弱い結合で低質量領域に潜んでいる可能性

## ISR-Photon

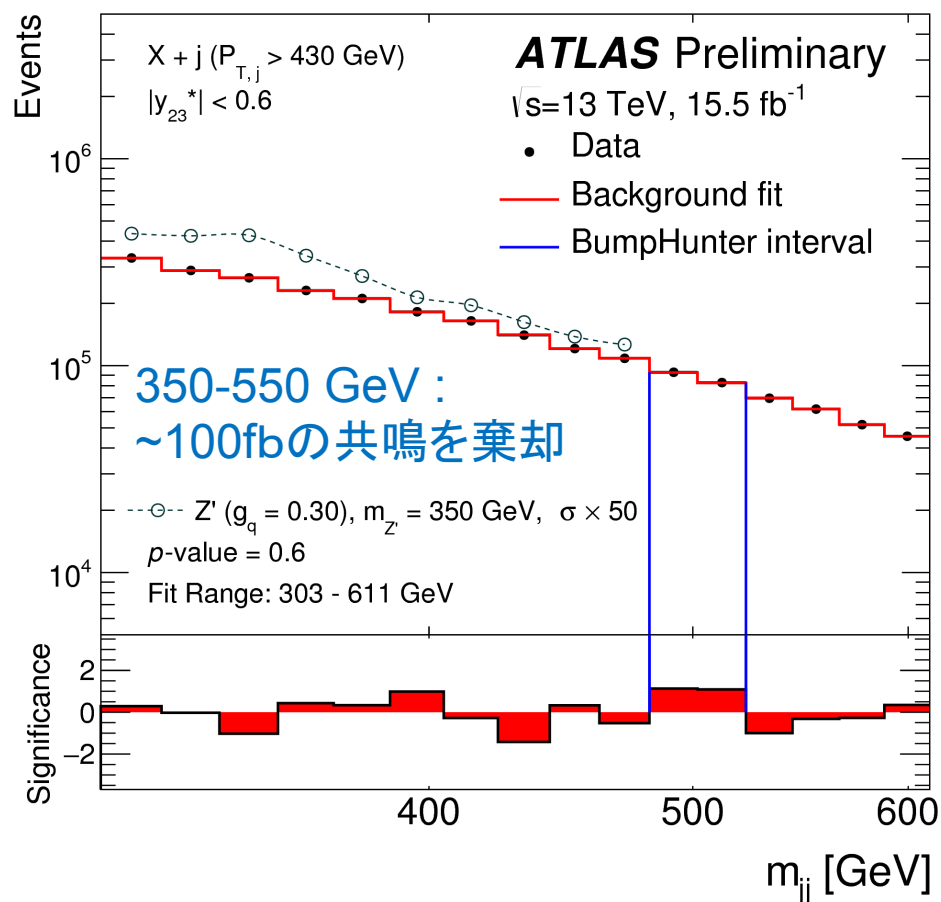
Trigger : 140 GeV  $\gamma$   
 ISR 150 GeV photon  
 2 jet  $p_T > 25$  GeV  $|h| < 2.8$ ,  
 $y^* < 0.8$



## ISR-Jet

[ATLAS-CONF-2016-070](#)

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

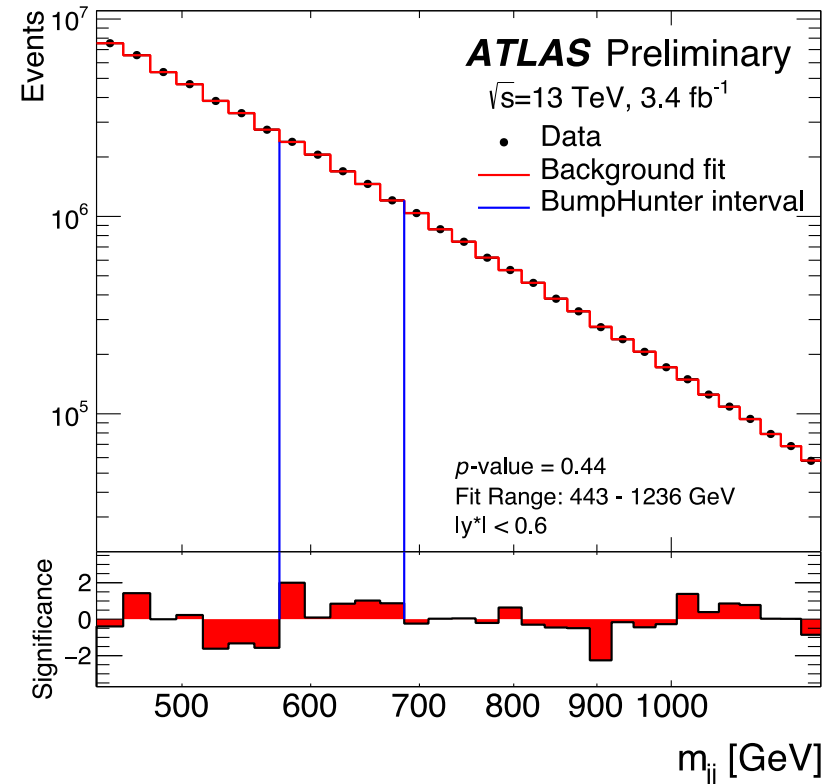
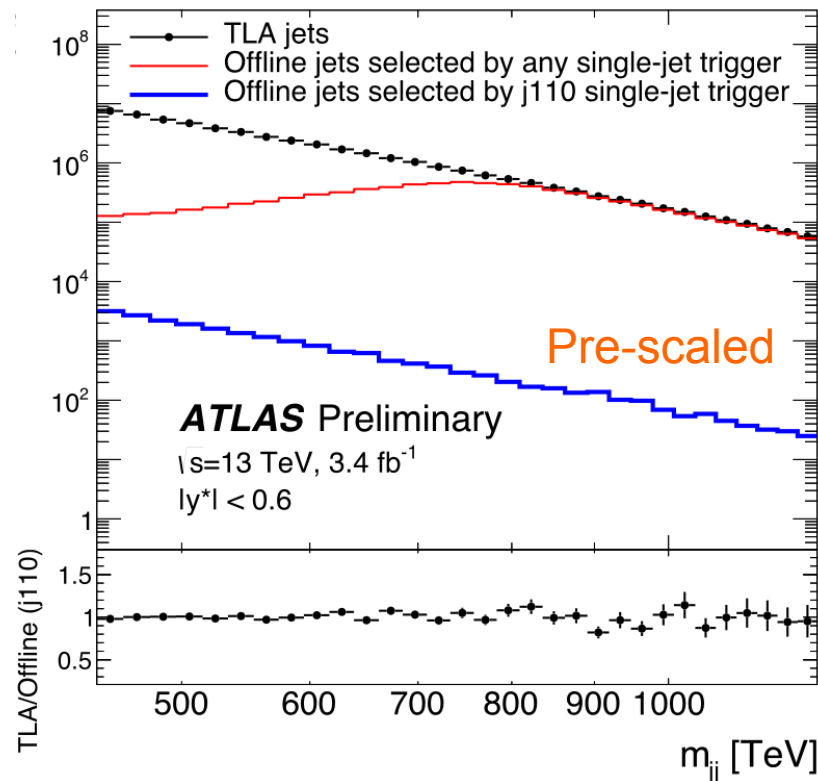


# トリガーレベル解析: TLA jets

- 読み出しのバンド幅と保存領域に制限  
→ data scouting (トリガーレベルのJet再構成のみ(<5%)を高頻度で記録)
- LHC 4実験がRun-2から採用
  - ATLAS: L1 jet trigger (J75) 事象を記録→オフライン・しきい値 185GeV
  - CMS : HLT trigger条件を緩和→ HT=800→250GeV
- Pre-scale(間引き)なしで 500GeVまで探索範囲を拡大

JES誤差は約2倍

[ATLAS-CONF-2016-030](#)

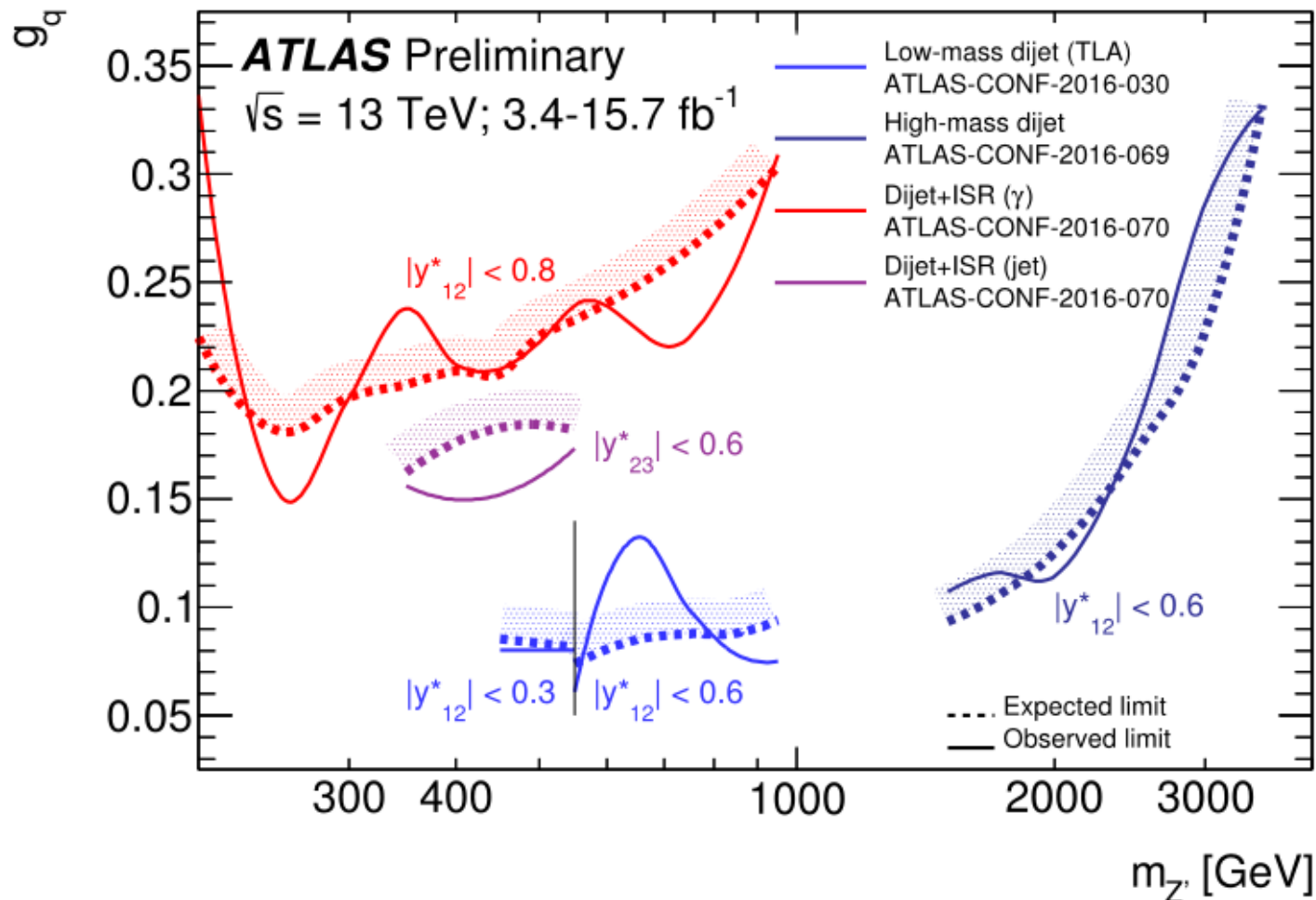


# Di-jet 探索まとめ

- 3通りの解析: 質量領域を拡大して探索  
(Lepto-phobic axial-vector mediatorを仮定)

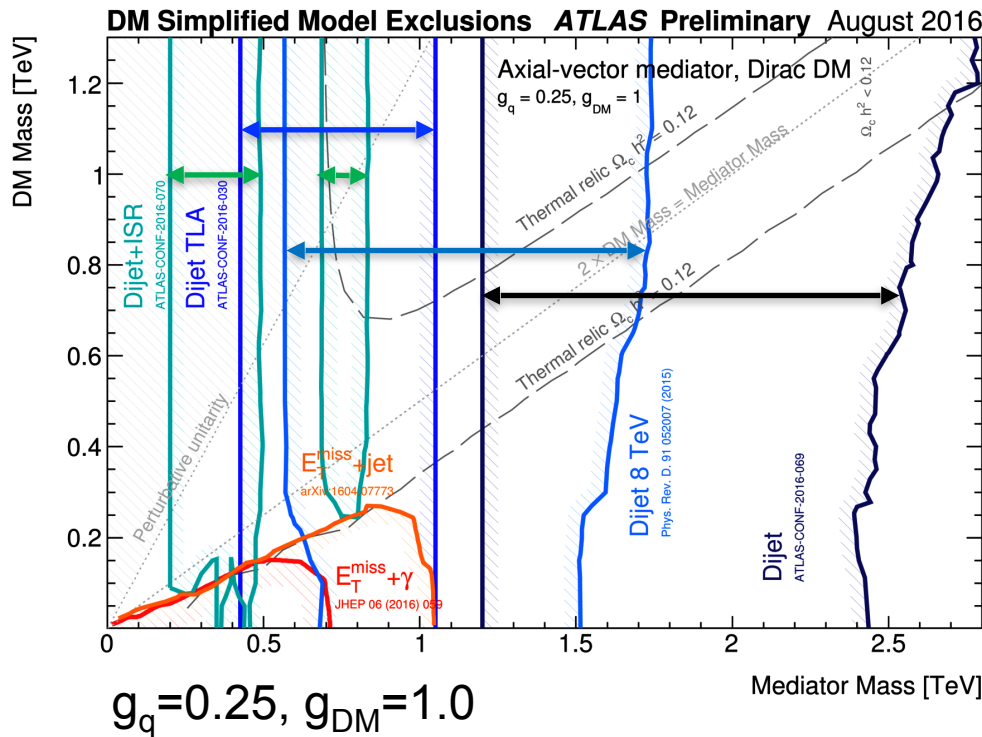
[2015+2016 Exotics Summary Plot](#)

断面積上限を mediator- quark 結合の上限に焼き直し

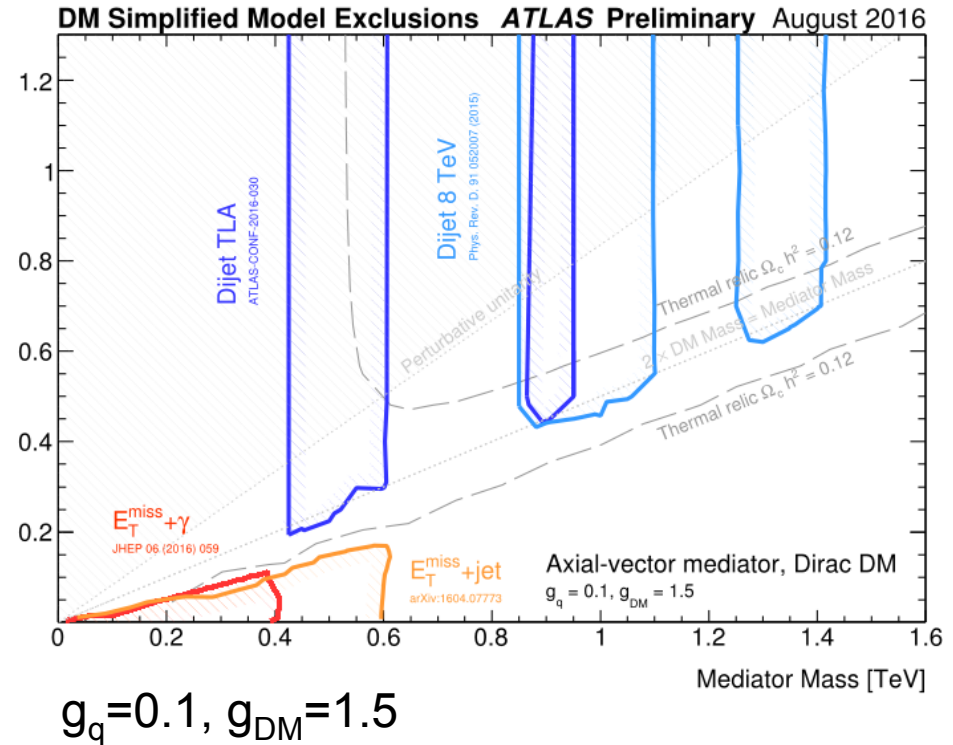




## 2015+2016 Exotics Summary Plot



Mediator質量 0.2 - 2.5 TeV に渡り棄却  
 (8TeV + 13TeV を合せた結果)

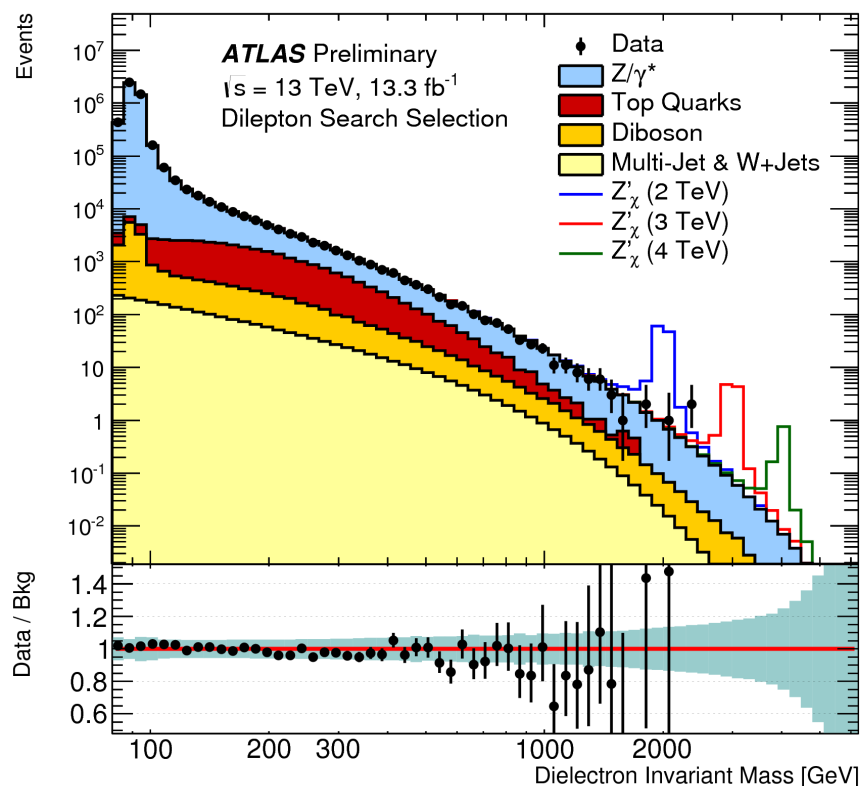


qqへの崩壊が抑制される→Di-jet感度低下  
 生成も抑制される→DMへの感度も低下

# その他、新粒子探索

# Z' 探索 (荷電レプトンペア)

- ee or  $\mu\mu$  (Z' または contact interaction)
- Di-jetと並び、最初に確認すべきチャンネル
- 主なBG DY Z/ $\gamma^*$ : NNLO計算で形を決めて、Z peakで規格化

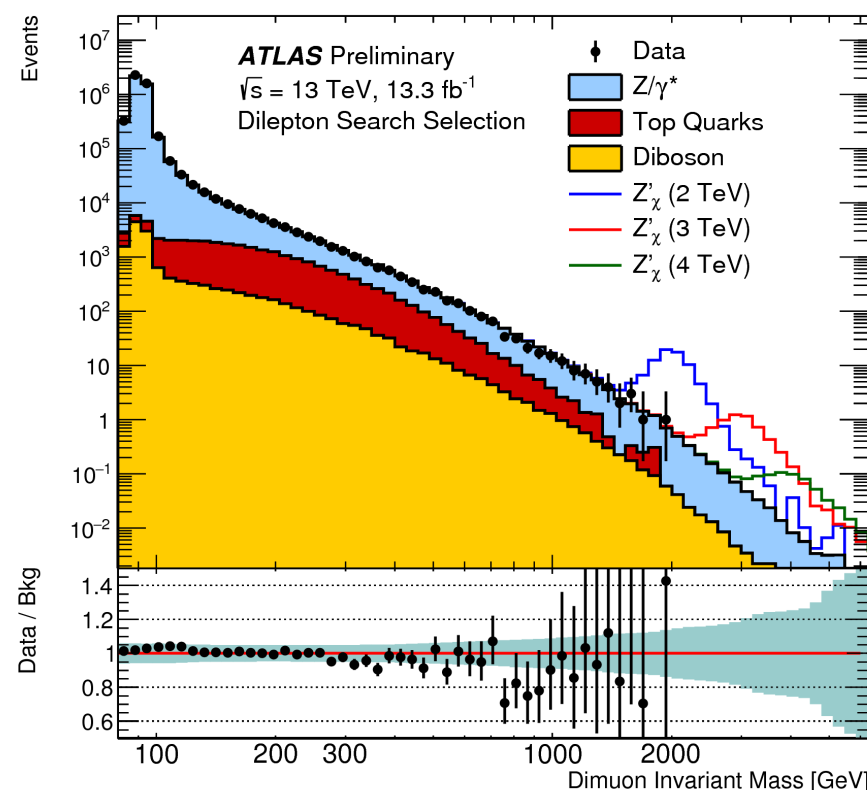


電子チャンネルの選別

電子トリガ ET (17/17 GeV)

オフラインCut ET (30/30 GeV)  $|\eta| < 2.47$

Isolation Cut



muonチャンネルの選別

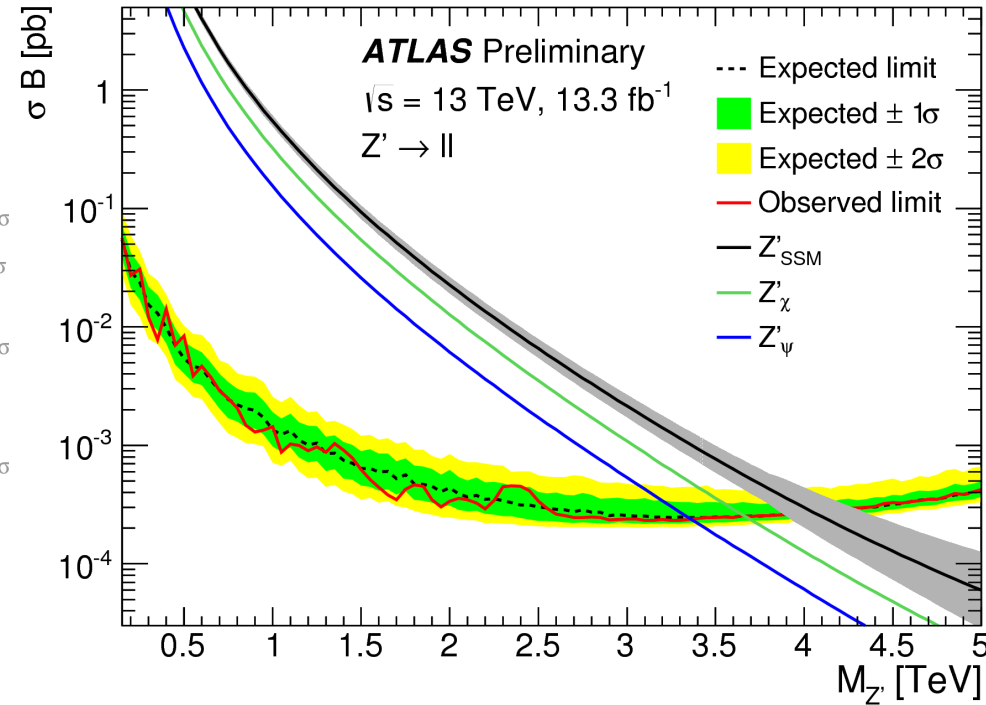
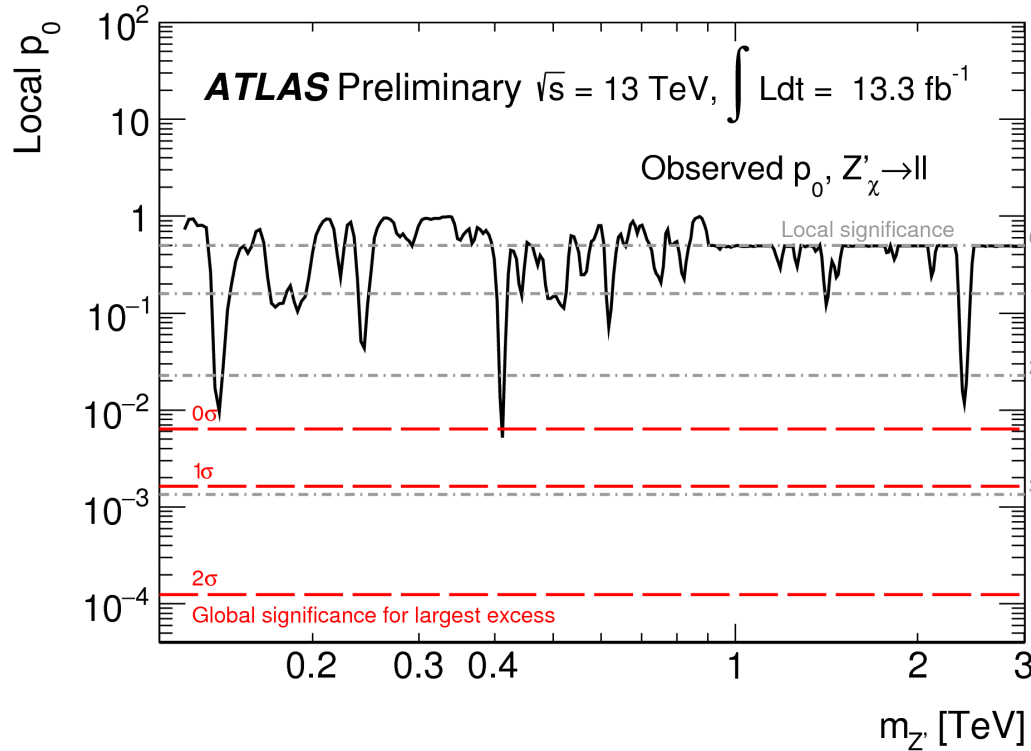
muonトリガ pT (26i/50 GeV)

オフラインCut pT (30/30 GeV)  $|\eta| < 2.5$

Isolation Cut, 異符号



# Z' 探索 (荷電レプトンペア)



兆候はなし  
 localで2 $\sigma$ 超えは幾つかあるが  
 globalでは0 $\sigma$

Z'質量制限はRun-1から  
 約1.2 TeV更新 (2015から0.7TeV)

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

Run1

2.90  
2.62

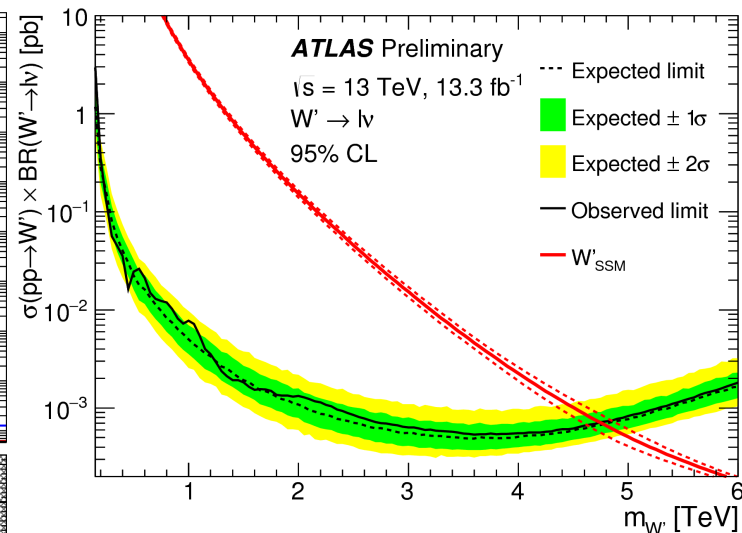
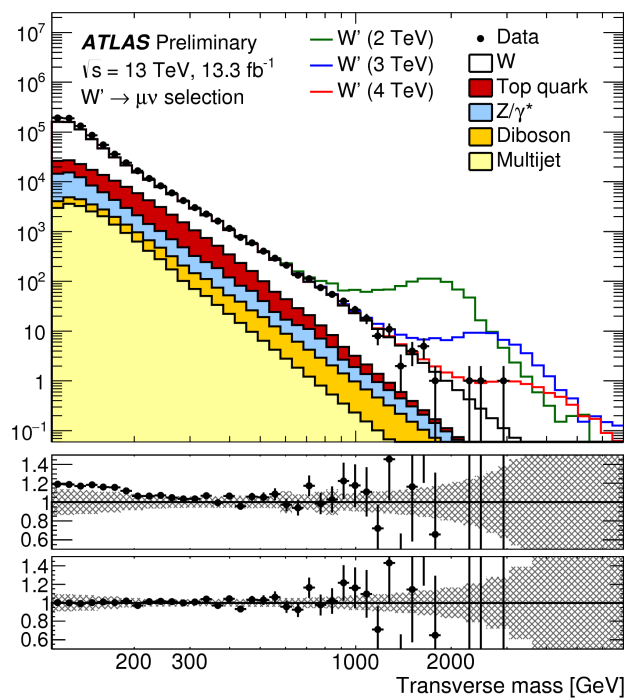
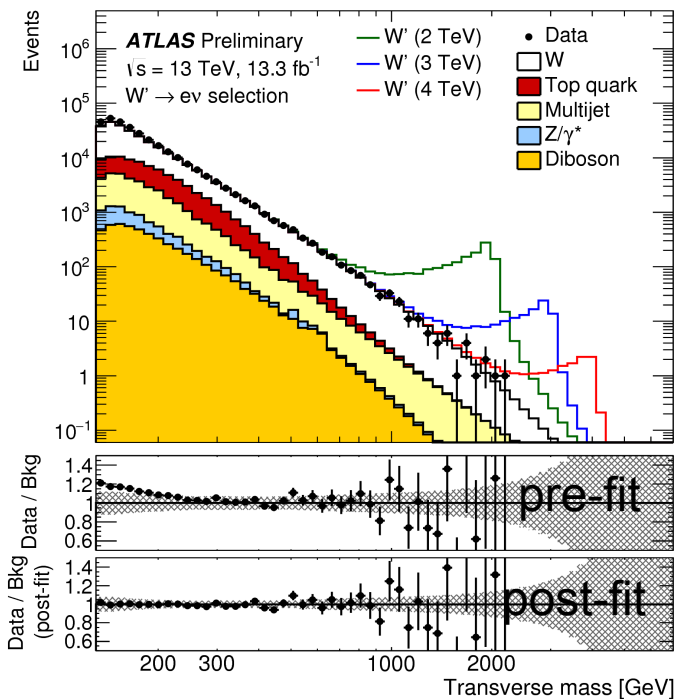
2.51

# W' 探索 (荷電レプトン+MET)

- e + MET or  $\mu$  + MET
- 横質量の再構成

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

ATLAS-CONF-2016-061



電子チャンネルの選別

電子トリガ ET (1e 60 GeV)

オフラインCut ET (65 GeV)  $|\eta| < 2.47$

Isolation Cut

muonチャンネルの選別

muonトリガ pT (1 $\mu$  50 GeV)

オフラインCut pT (55 GeV)  $|\eta| < 2.5$

Isolation Cut

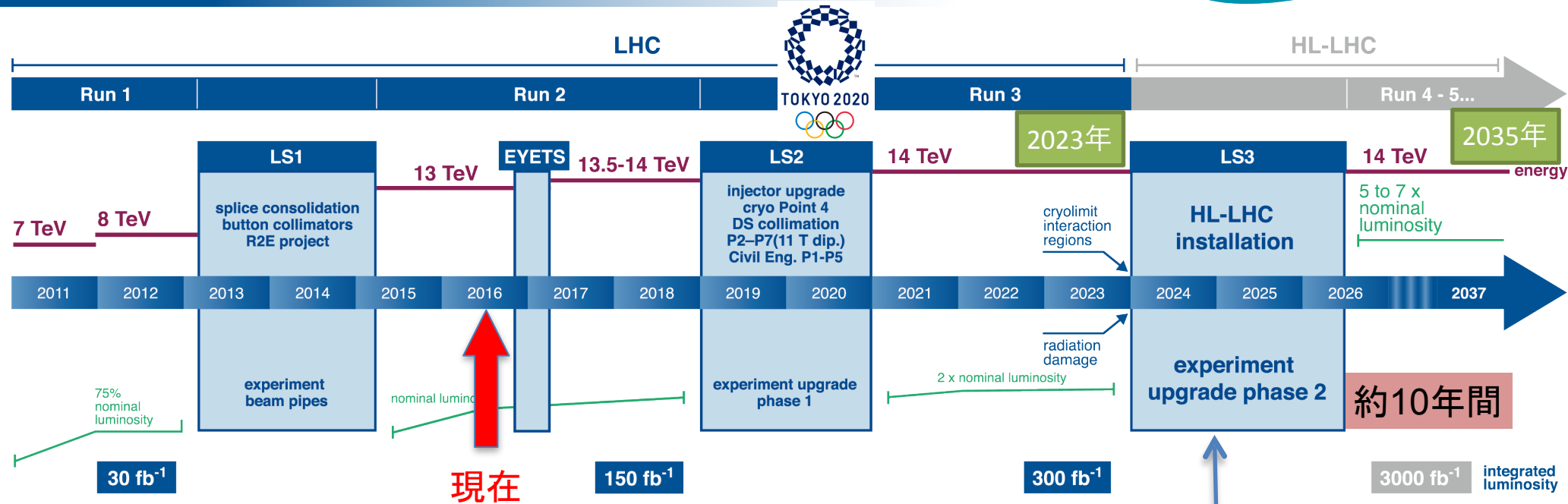
Decay	$m_{W'}$ lower limit [TeV]	
	Expected	Observed
$W' \rightarrow e\nu$	4.59	4.64
$W' \rightarrow \mu\nu$	4.33	4.19
$W' \rightarrow \ell\nu$	4.77	4.74

Run-1 3.2

1.5 TeV更新

# LHC 今後の計画

## LHC / HL-LHC Plan



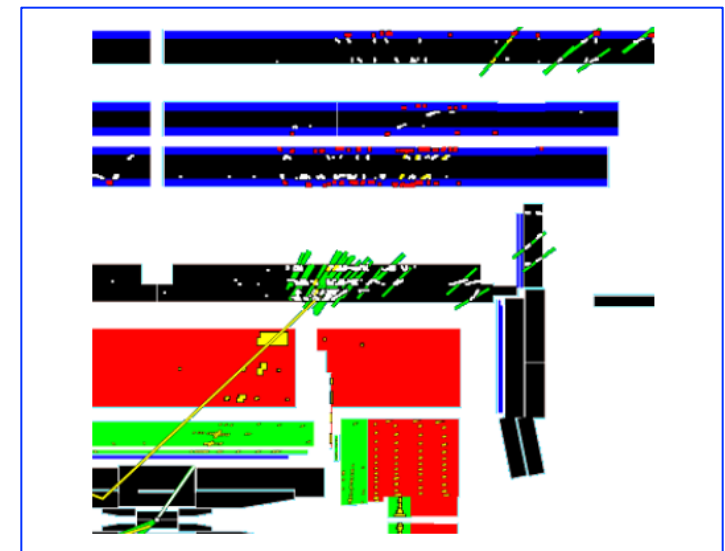
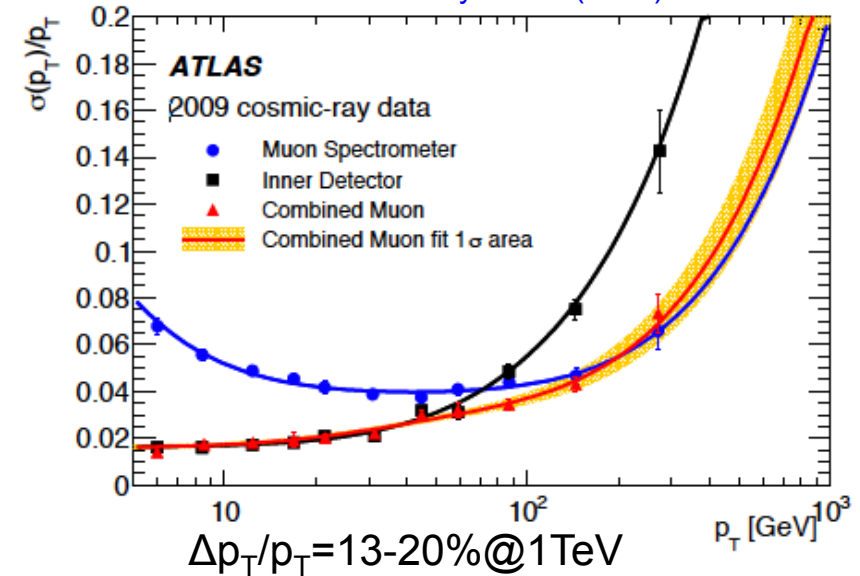
HL-LHCでは

- 瞬間ルミノシティ:  $5 \text{ (nominal)} - 7.5 \text{ (ultimate)} \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$
- 積算ルミノシティ:  $3000 \text{ fb}^{-1}$

Inner trackerの総取り替え  
Tigger/DAQの総取り替え

約10年間

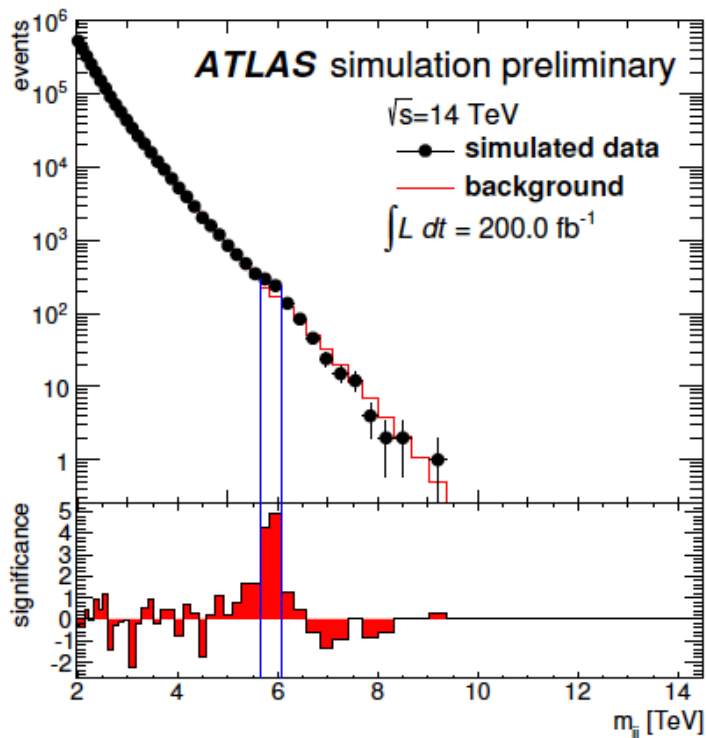
- 電子
  - 問題なし  
(エネルギー分解能は <1%で落ち着く)
- ミューオン
  - (より) 曲がらなくなる
  - 共鳴探索などでは電子が有利
- ジェット
  - pT分解能は5%未満
  - エネルギー較正：multi-jetバランスなどにより 2TeV付近まで問題なし
  - HCALからの漏れ: punch-through hadron 10% @  $p_T=2\text{TeV}$
  - 補正関数→JESの不定性



# Di-jet 探索の今後(典型例として)

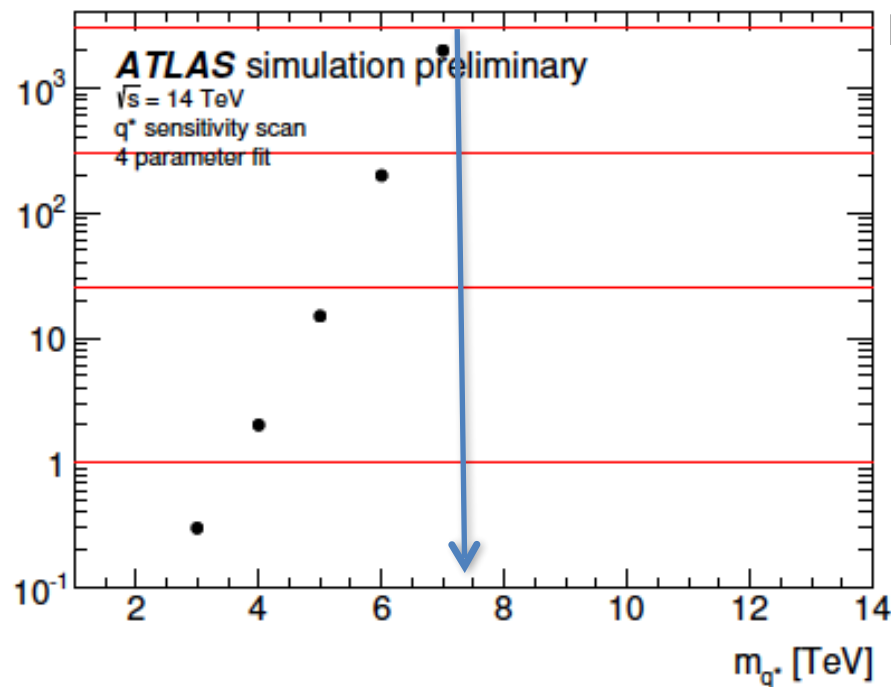


[ATL-PHYS-PUB-2015-004](#)



6 TeV  $q^*$   
(現在の95%CL limit 5.6 TeV)

discovery luminosity [ $\text{fb}^{-1}$ ]



発見への感度  
7 TeV強までである

HL-LHC完了時

LHC完了時

一度発見されれば、断面積決定  
angular correlationから模型への言及が可能

# まとめ (1)

---

## SUSY以外のBSM探索

- 750GeV 2光子共鳴探索に関するアップデート
  - ATLAS/CMS共に2015年に見られた超過は確認できず
  - 単に統計のふらつきで説明がつくのか、精査が必要
  - 発見感度が高いチャンネル：今後も期待
- DM探索：X+MET が多角的に進行中
  - これまでのところ兆候はなし、探索を継続
- その他のチャンネル
  - 兆候はなし、制限を大幅に更新
- このトークでカバーしていない様々なチャンネル
  - $2\sigma$ レベルの超過はいくつか存在、決定的なものはなし
  - [ATLAS Exotics public](#)、[CMS Exotica public](#)

## まとめ (2)

- 13TeV 最初の $10\sim 15 \text{ fb}^{-1}$  では決定的な超過は観測されず
- 今後は急に現れる”超過”は期待できず、ゆるやかに現れる”兆候”を待つ持久戦へ (ハドロン・コライダーの宿命)

### 750 GeV

- more than 400 papers!!!!
- 飢えた理論屋と統計の罨  
(local  $\sim 4\sigma$ , global  $\sim 2\sigma$ )
- global が重要ってヒッグスの発見の前に  
強調されたいのに…
- 色々アイデアが出たのは良かった

阿部智広さん(KMI)のスライド  
@新テラスケールキックオフ会合

- 「トラウマ」、「二日酔い」の理論屋さんが多いと聞きます
- “兆候” → “確実”へは更に時間が必要、なので”確実”を待たずに、“兆候”の段階から、是非いろいろなアイデア・論文をお願いします



# Extra Slides

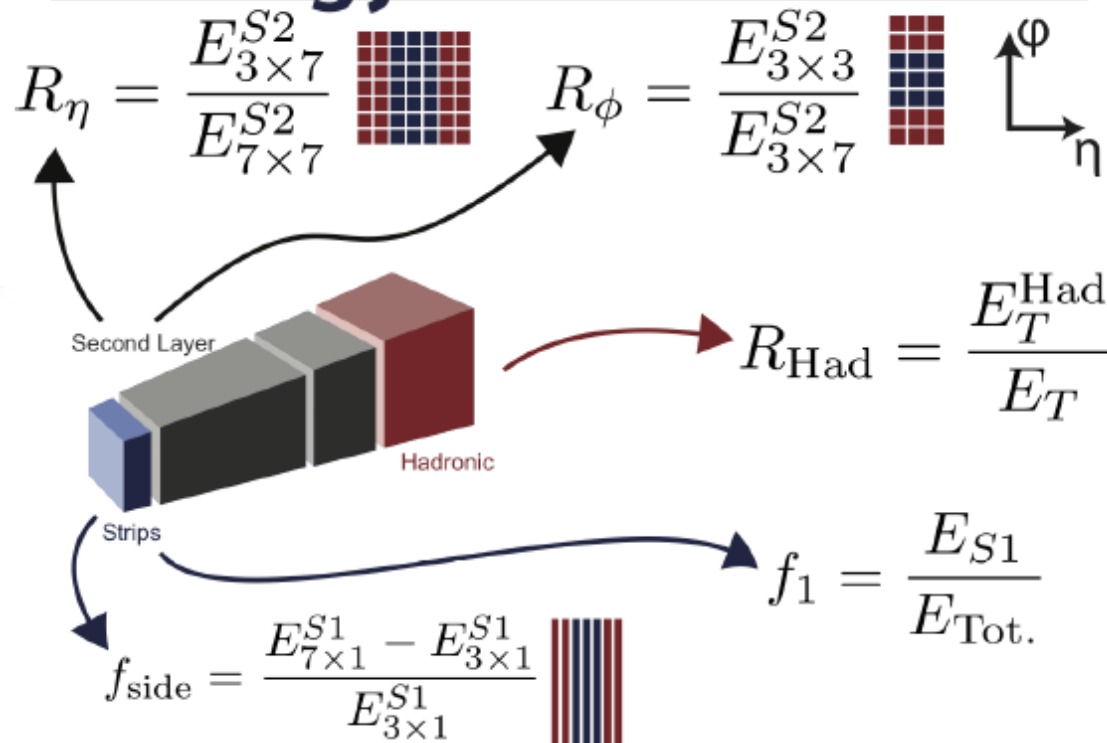
# Photon identification

by courtesy of Marco Delmastro

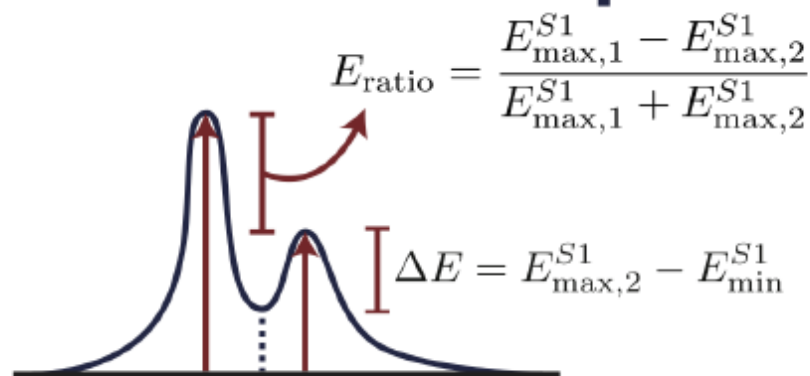
## Variables and Position

	Strips	2nd	Had.
Ratios	$f_1, f_{\text{side}}$	$R_\eta^*, R_\phi$	$R_{\text{Had.}}^*$
Widths	$w_{s,3}, w_{s,\text{tot}}$	$w_{\eta,2}^*$	-
Shapes	$\Delta E, E_{\text{ratio}}$	* Used in PhotonLoose.	

## Energy Ratios



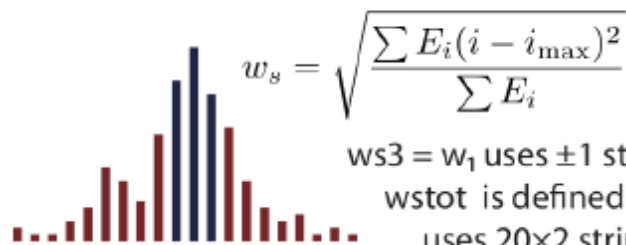
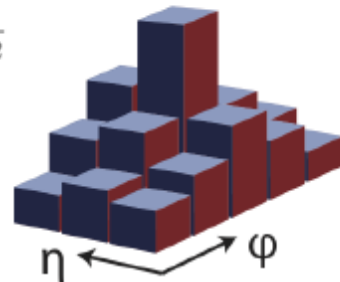
## Shower Shapes



## Widths

$$w_{\eta,2} = \sqrt{\frac{\sum E_i \eta_i^2}{\sum E_i} - \left( \frac{\sum E_i \eta_i}{\sum E_i} \right)^2}$$

Width in a  $3 \times 5$  ( $\Delta\eta \times \Delta\phi$ ) region of cells in the second layer.

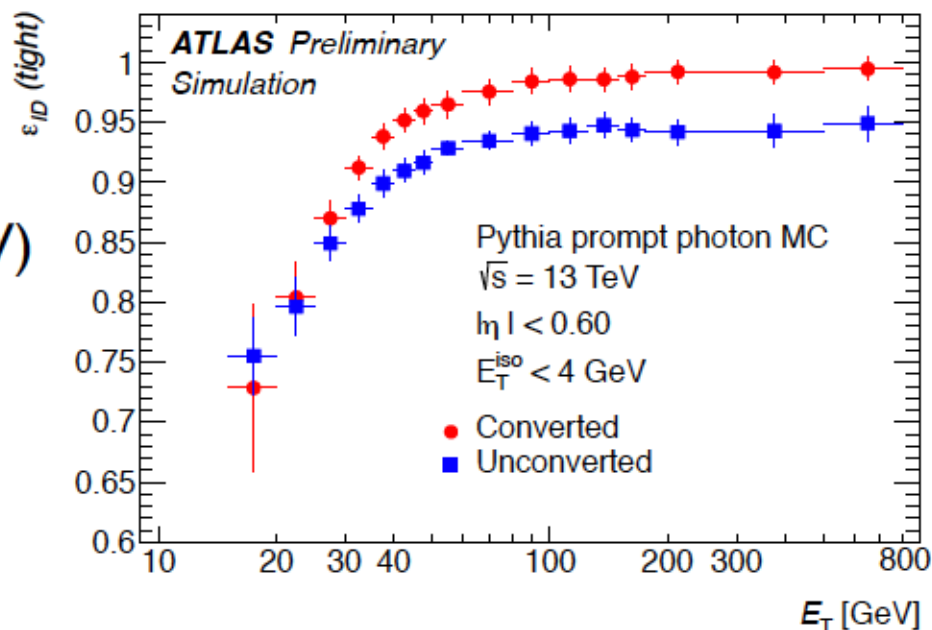


$w_{s3} = w_s$  uses  $\pm 1$  strips (three total);  
 $w_{s\text{tot}}$  is defined similarly, but uses  $20 \times 2$  strips.

# Photon identification and isolation

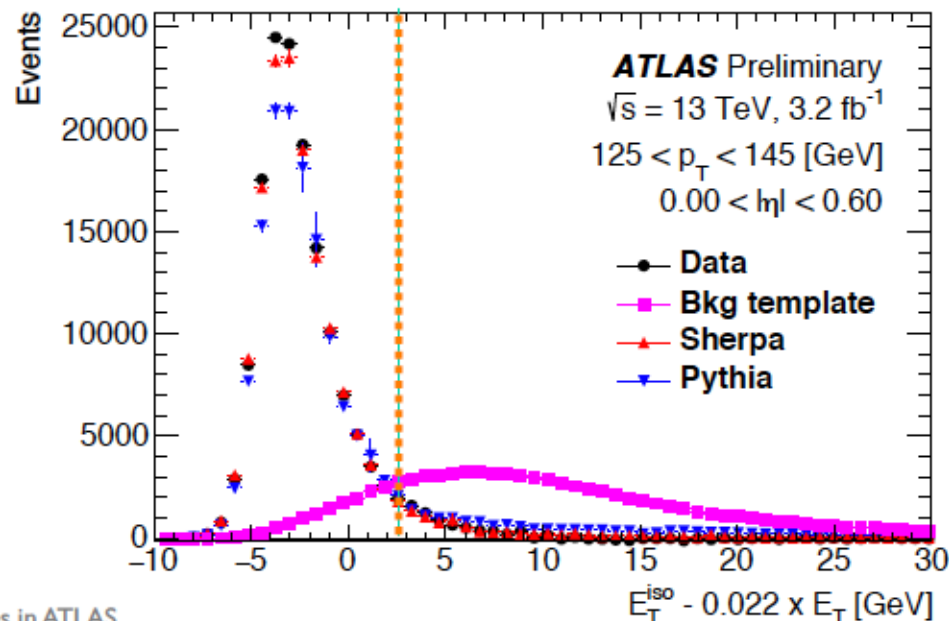
- **Identification**

- ✓ 85% ( $E_T \sim 50$  GeV) - 95% ( $E_T \sim 200$  GeV)
- ✓ Uncertainty: full data/MC difference
  - $\pm 1\%$  -  $\pm 5\%$  for  $E_T > 50$  GeV
  - $\eta$  dependent



- **Isolation**

- ✓ Calorimeter ( $\Delta R = 0.4$ )
  - $E_T^{iso} < 0.022 E_T^Y + 2.45$  GeV
- ✓ Track  $p_T^{iso}$  ( $\Delta R = 0.2$ )
  - $p_T^{iso} < 0.05 E_T^Y$
- ✓ Uncertainty: full data/MC difference



by courtesy of Marco Delmastro

## SPin-0 analysis

Optimized for the middle range  
where there are enough data events

- using a smooth functional form, fully data-driven to model the total background (sidebands)

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

$$x = \frac{m_{\gamma\gamma}}{\sqrt{s}}$$

- k=0 (lowest D.O.F) is selected
- validated with MC, data

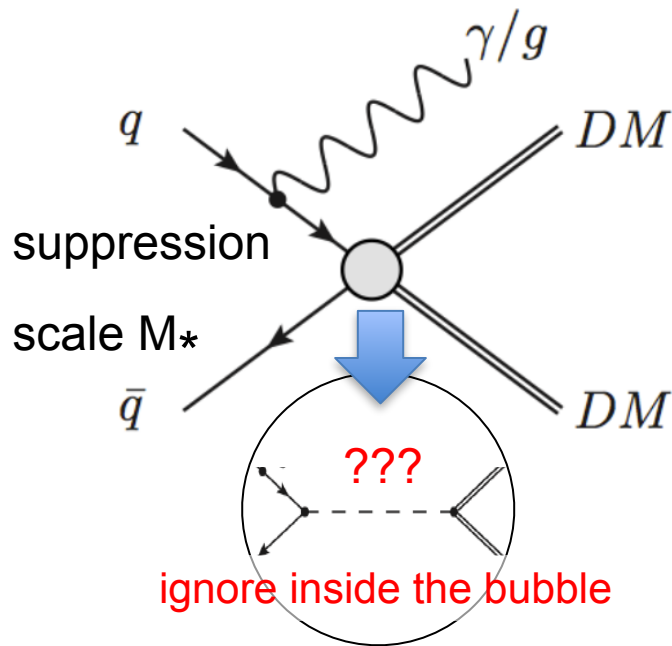
## SPin-2 analysis

- Optimized at searching for high mass range (not enough events)
- Diphoton (irreducible) : MC
  - DIPHOX NLO shape/XS
  - Sherpa event level
- $\gamma j, j\gamma, jj$  (reducible) : data
  - control region : inverting tight shower shape criteria

# DM models at LHC (in Run-1)

- **Effective Field Theory (EFT)** : provides simple framework to compare collider and non-collider experiments

**Eur. Phys. J. C75 (2015) 299**

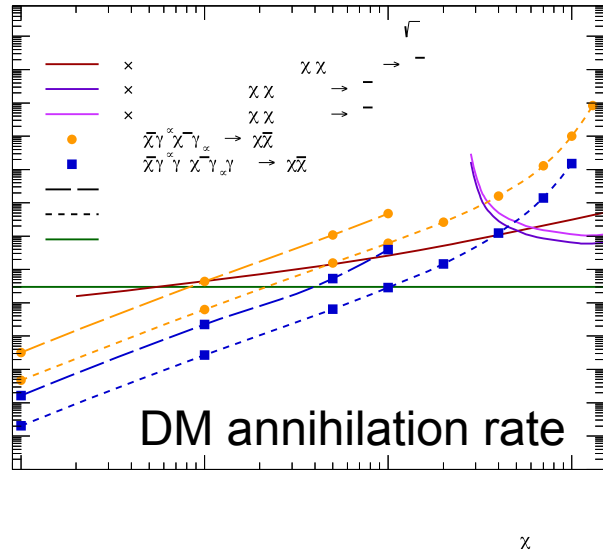
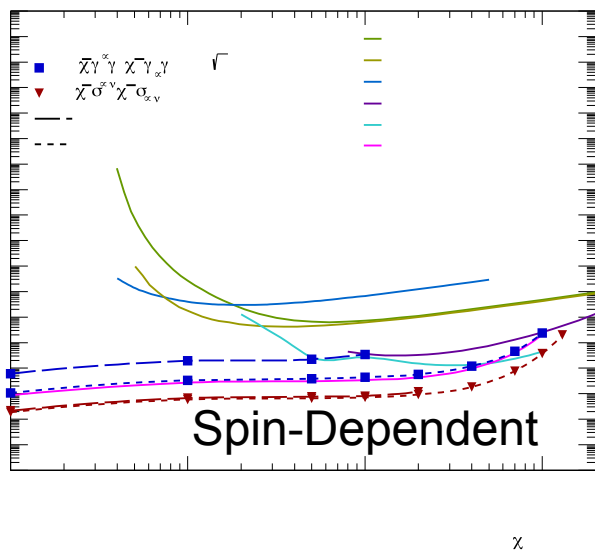
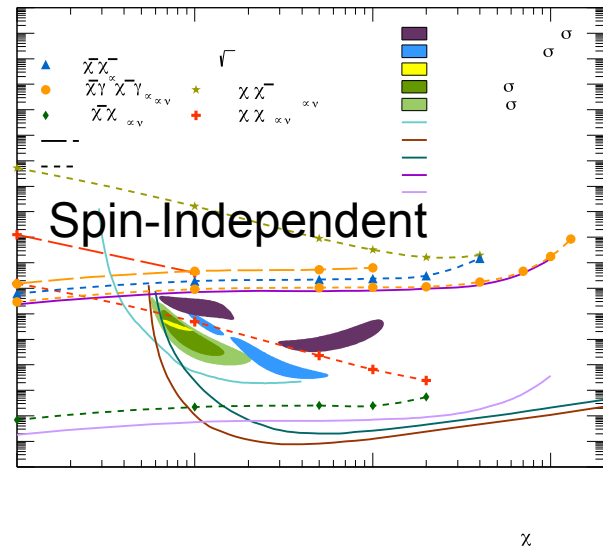
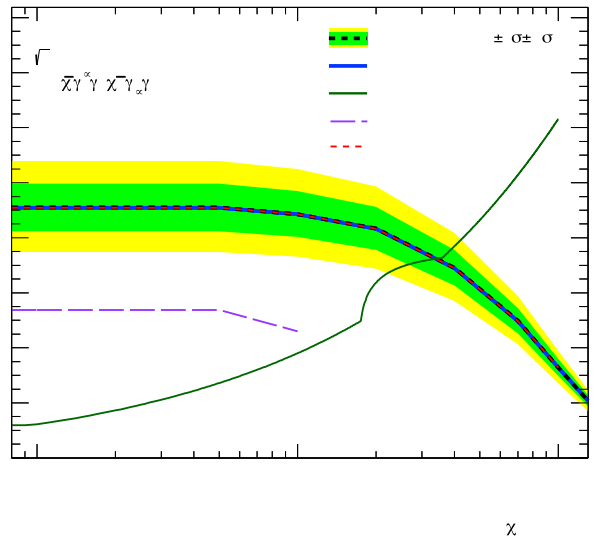


Scalar  
Dirac Fermion

Name	Initial state	Type	Operator
C1	$qq$	scalar	$\frac{m_q}{M_*^2} \chi^\dagger \chi \bar{q} q$
C5	$gg$	scalar	$\frac{1}{4M_*^2} \chi^\dagger \chi \alpha_s (G_{\mu\nu}^a)^2$
D1	$qq$	scalar	$\frac{m_q}{M_*^3} \bar{\chi} \chi \bar{q} q$
D5	$qq$	vector	$\frac{1}{M_*^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \chi \bar{q} \gamma_\mu q$
D8	$qq$	axial-vector	$\frac{1}{M_*^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \gamma^5 \chi \bar{q} \gamma_\mu \gamma^5 q$
D9	$qq$	tensor	$\frac{1}{M_*^2} \bar{\chi} \sigma^{\mu\nu} \chi \bar{q} \sigma_{\mu\nu} q$
D11	$gg$	scalar	$\frac{1}{4M_*^3} \bar{\chi} \chi \alpha_s (G_{\mu\nu}^a)^2$

- **Limited validity** : assumption  $m_{\text{mediator}} \gg Q(\text{interaction})$  (Fermi constant like couplings)
- Frequently used during Run-1 8TeV (2010–2012), often criticized
- **Migrating to “simplified model” from the end of Run-1**

# 8TeV Results (EFT limits vs. Non-collider WIMP searches)



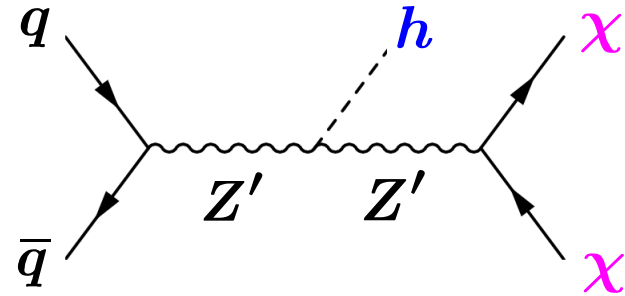
truncation (use small Q events only) to check the EFT validity

Eur. Phys. J. C75 (2015) 299

Collider searches insensitive to WIMP mass (when lighter than MET, jet cuts)  
 Limit keeps constant below a few GeV  $\rightarrow$  Complementary to non-collider exp.

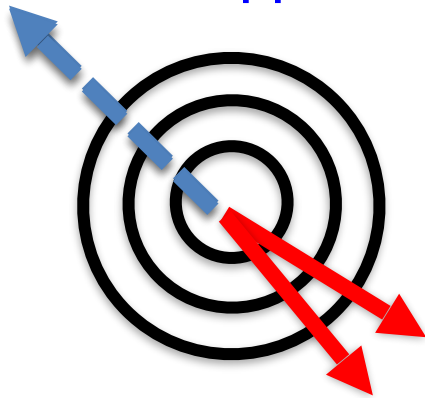
# Mono-Higgs 探索 (13 TeV)

- Higgs couples to Dark Sector



Looked into three H final states

$H \rightarrow \gamma\gamma$



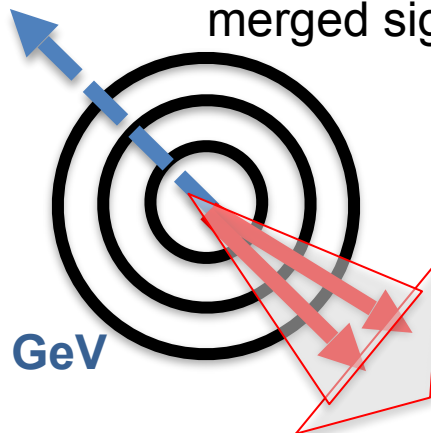
At least **2 photons**  
(tight ID, isolated)

$105 \text{ GeV} < m_{\gamma\gamma} < 160 \text{ GeV}$

Other requirements on  
 $p_T^{\gamma\gamma}$ , MET

$H \rightarrow bb$

merged signal

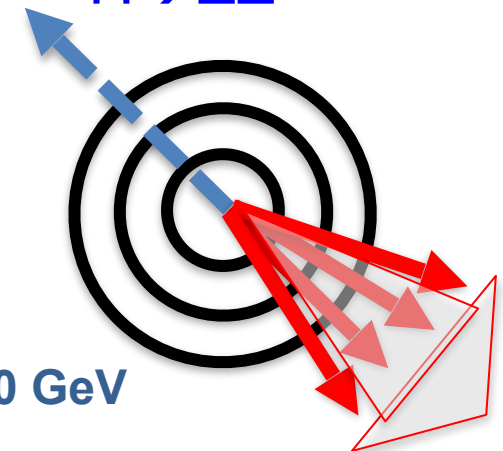


MET  
> 500 GeV

**One large-radius jet**  
(associated with 2-trk jets)

Resolved signal region  
for MET < 500 GeV  
(requiring 2 jets)

$H \rightarrow ZZ$

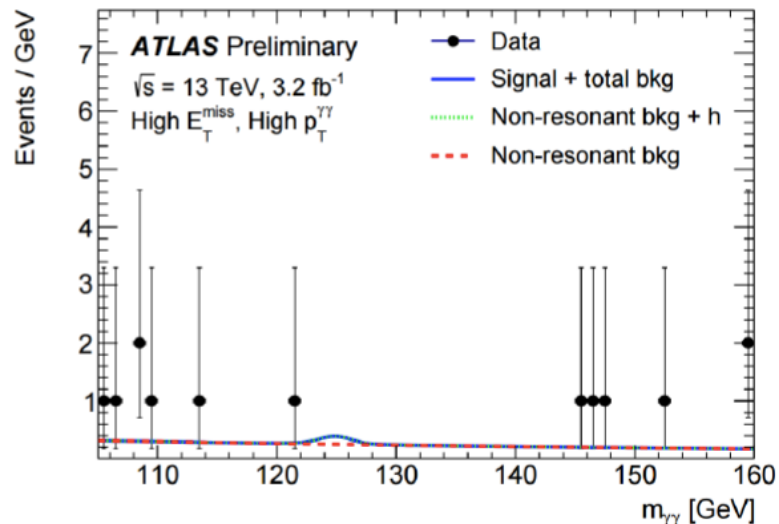


MET  
> 100 GeV

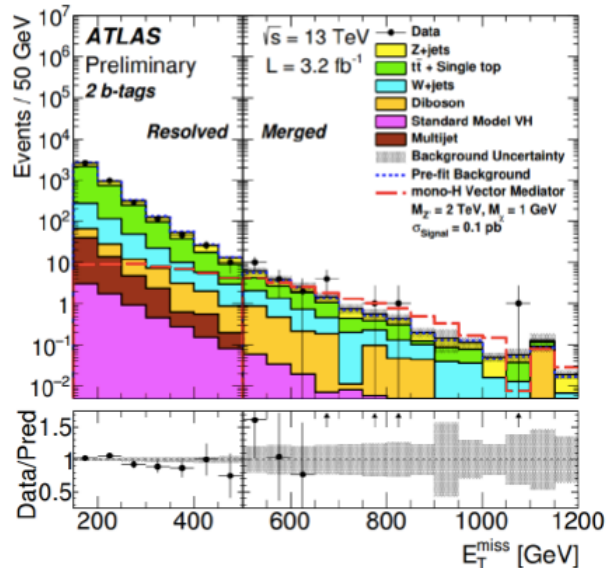
**Require 4 leptons**  
 $110 < m_{4l} < 140 \text{ GeV}$

# Mono-Higgs searches (13 TeV)

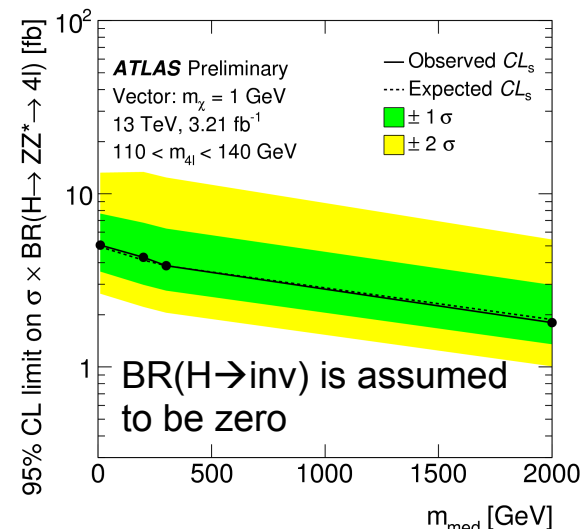
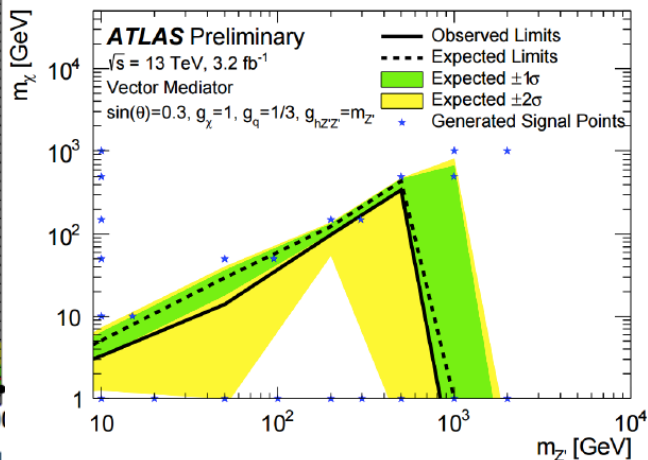
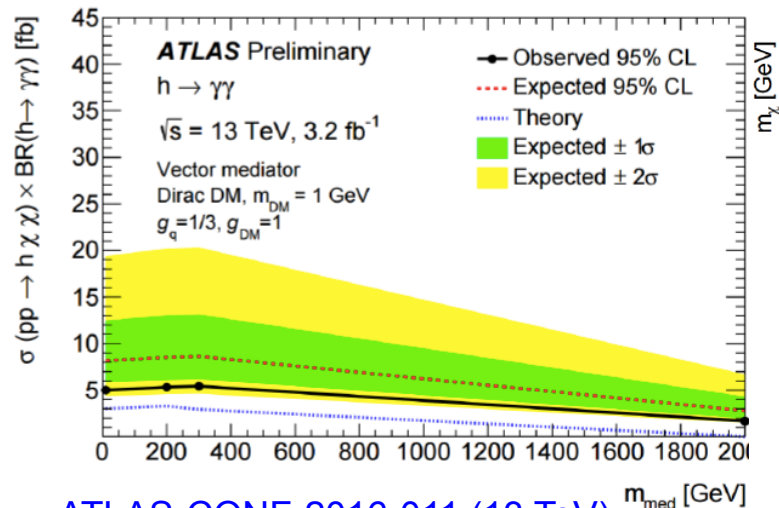
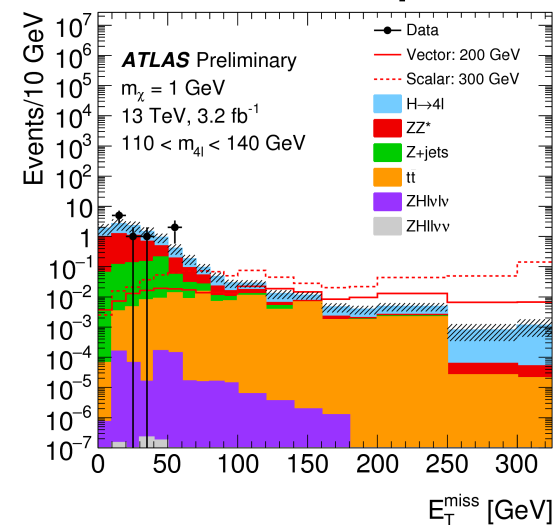
## $H \rightarrow \gamma\gamma$



## $H \rightarrow bb$



## $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{lep}$

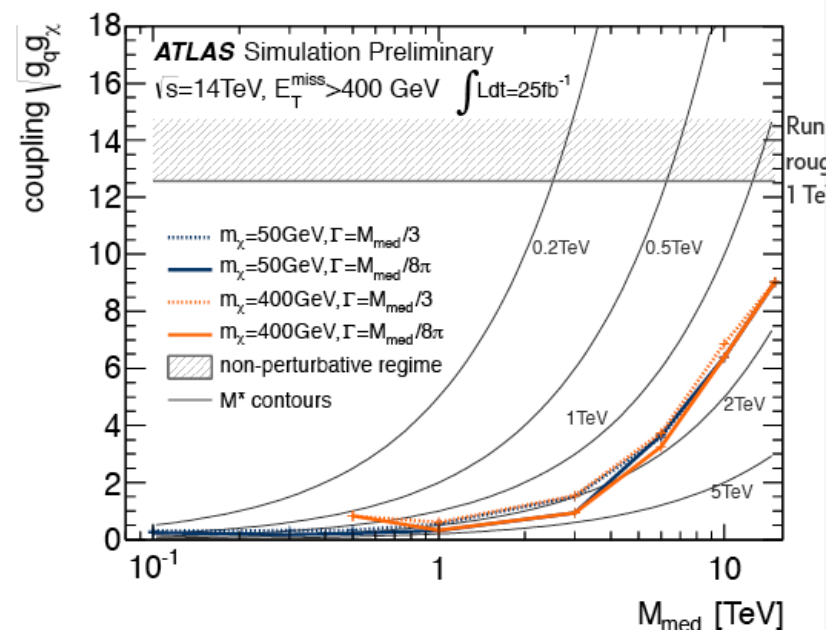
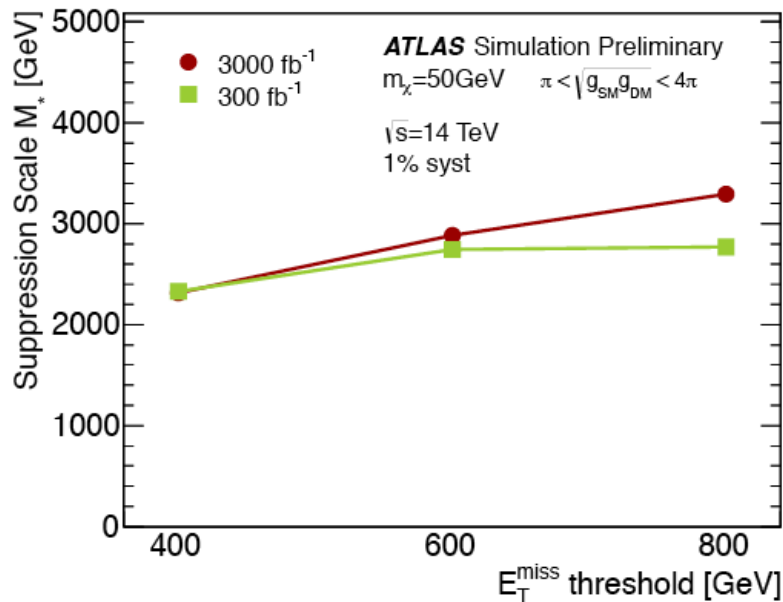
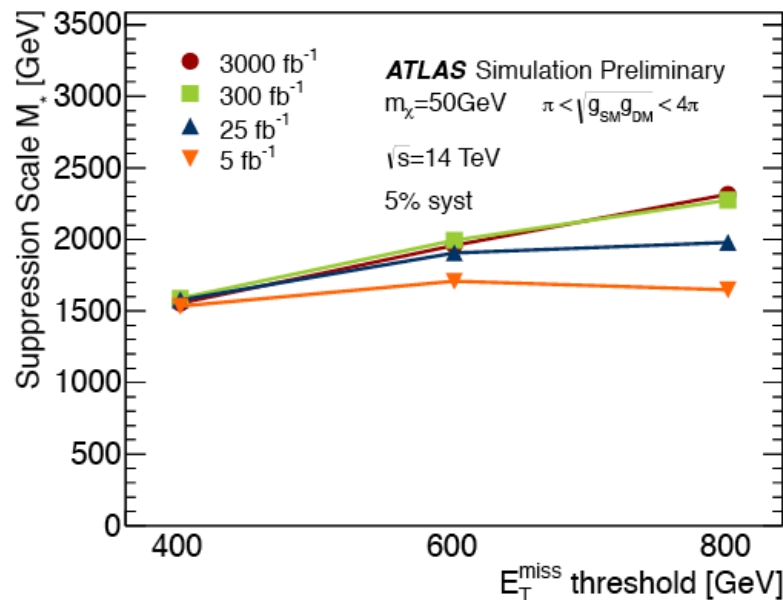
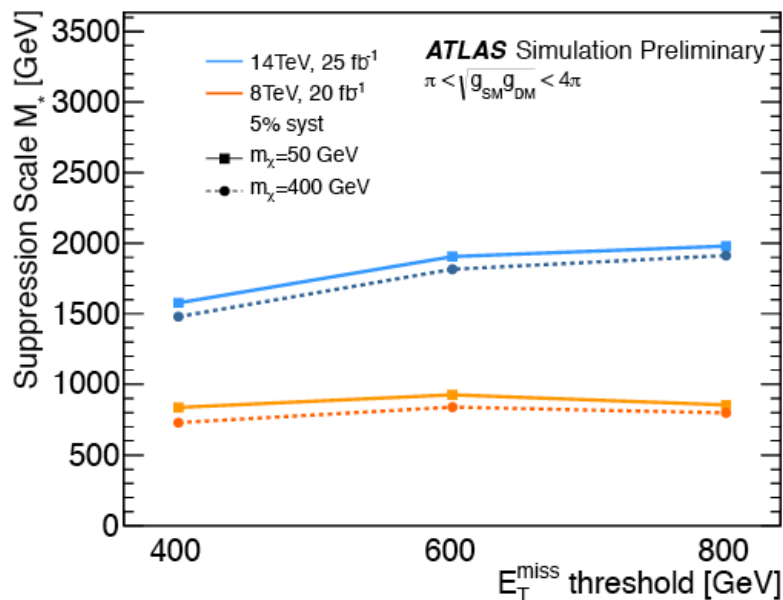


ATLAS-CONF-2016-011 (13 TeV)  
 Phys. Rev. Lett. 115, 131801 (8 TeV)

ATLAS-CONF-2016-019 (13 TeV)  
 Phys. Rev. D 93, 072007 (8 TeV)

ATLAS-CONF-2015-059 (13 TeV)

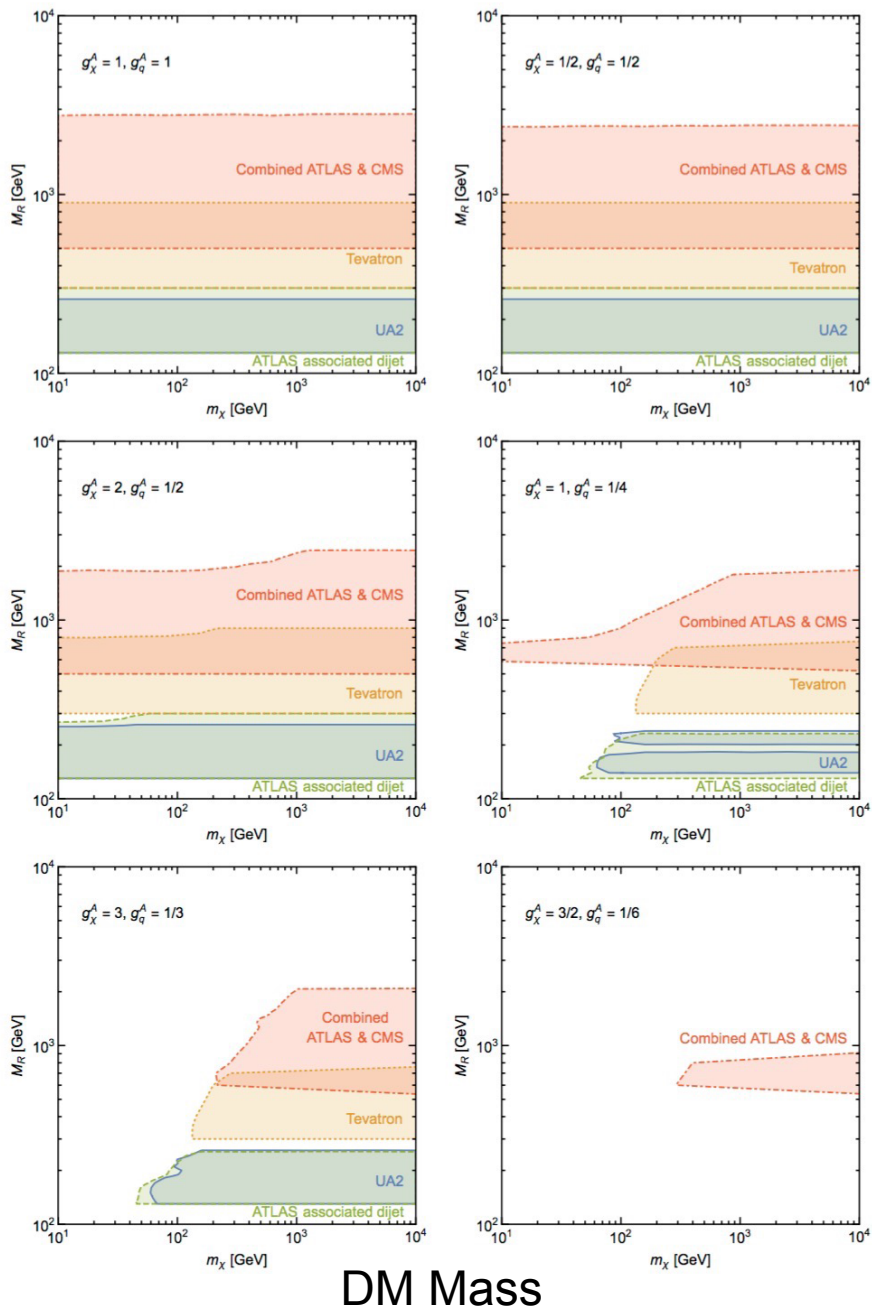
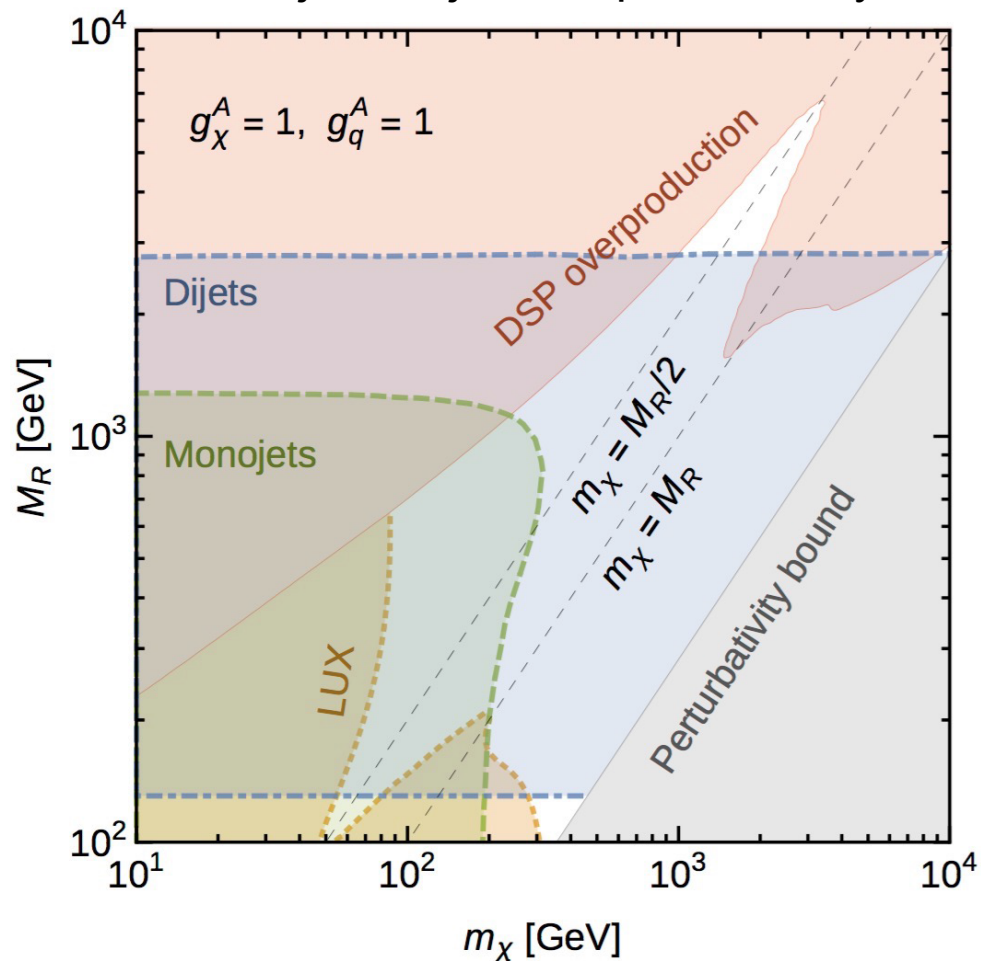




Collider coverage Strongly relying on the coupling strength assumed

[arXiv:1503.05916v2](https://arxiv.org/abs/1503.05916v2)

Mono-jet + Dijet Complementarity



Axial-Vector Z' Mass

DM Mass

# Transferring the limits to DM-Nucleon cross section


Vector type mediator

$$\sigma_{\text{SI}}^0 = \frac{9 g_{\text{DM}}^2 g_q^2 \mu_{n\chi}^2}{\pi M_{\text{med}}^4} \quad \text{JHEP01(2015)037}$$

$$\approx 1.1 \times 10^{-39} \text{ cm}^2 \cdot \left( \frac{g_{\text{DM}} g_q}{1} \right)^2 \left( \frac{1 \text{ TeV}}{M_{\text{med}}} \right)^4 \left( \frac{\mu_{n\chi}}{1 \text{ GeV}} \right)^2$$

Axial-Vector type mediator

$$\sigma_{\text{SD}}^0 = \frac{3 g_{\text{DM}}^2 g_q^2 (\Delta_u + \Delta_d + \Delta_s)^2 \mu_{n\chi}^2}{\pi M_{\text{med}}^4}$$

10% uncertainties 

$$\approx 4.6 \times 10^{-41} \text{ cm}^2 \cdot \left( \frac{g_{\text{DM}} g_q}{1} \right)^2 \left( \frac{1 \text{ TeV}}{M_{\text{med}}} \right)^4 \left( \frac{\mu_{n\chi}}{1 \text{ GeV}} \right)^2$$

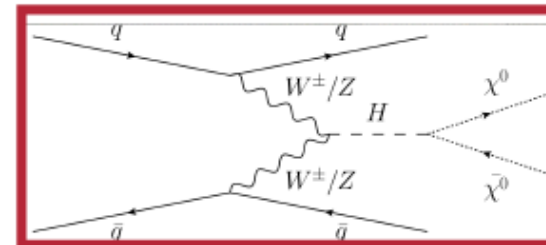
point like nucleon in the non-relativistic limit

# Results: DM and Higgs

arXiv:1508.07869 , JHEP11(2015)206, Phys. Rev. Lett. 115, 131801 (2015)

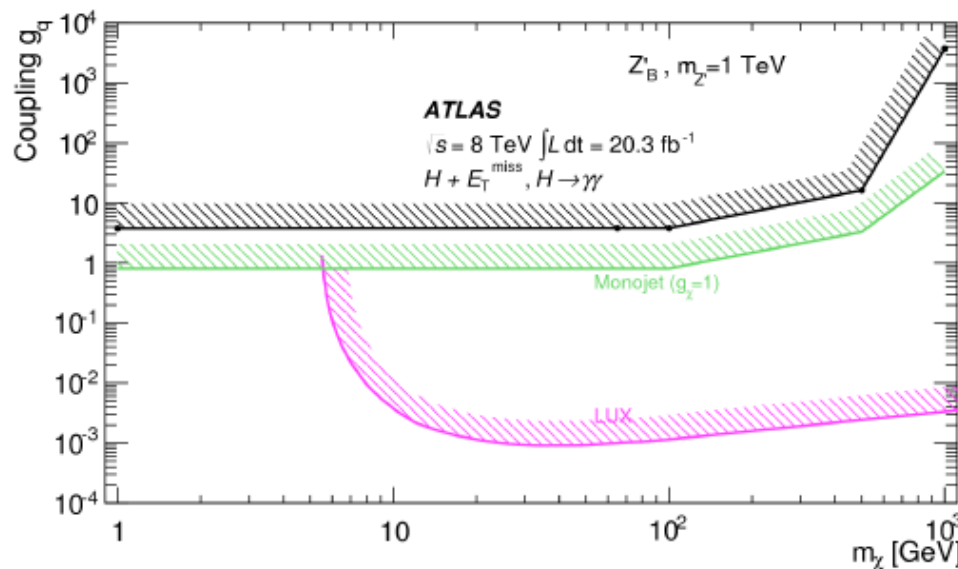
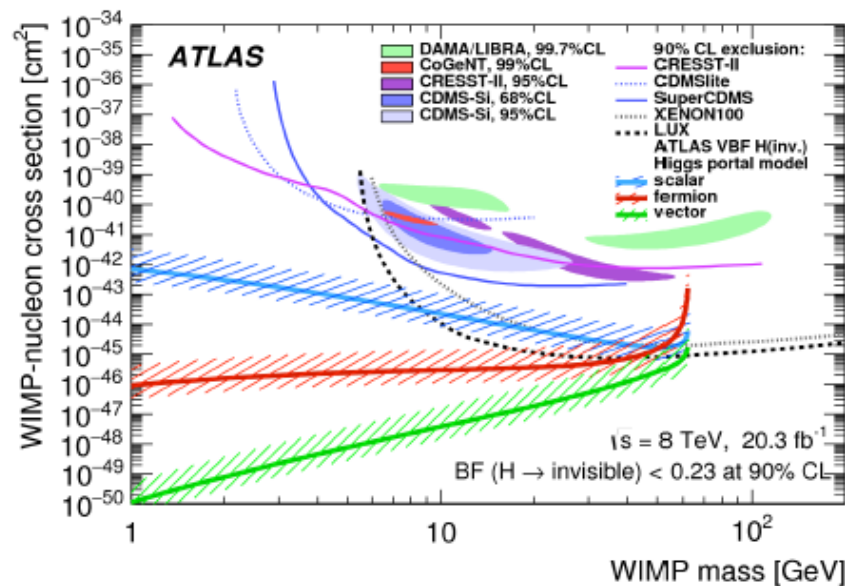
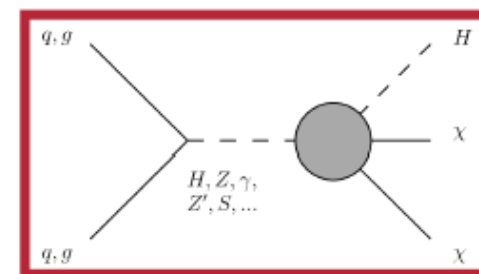
For  $m_{DM} < m_H/2$ : BR ( $H \rightarrow inv.$ ) relevant  $\leftarrow$  expected

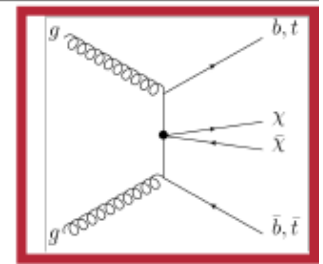
- BR ( $H \rightarrow inv.$ ) < 28% (31%) from VBF
- BR ( $H \rightarrow inv.$ ) < 25% (27%) from combination with WH/ZH



For  $m_{DM} > m_H/2$ : mono-Higgs relevant

- Interesting, because probe cannot be ISR (as opposed to other mono-X signatures)
- decay channels  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow b\bar{b}$  (poster by Jia Jian TEOH) studied
- Interpretation done both for EFT and simplified model





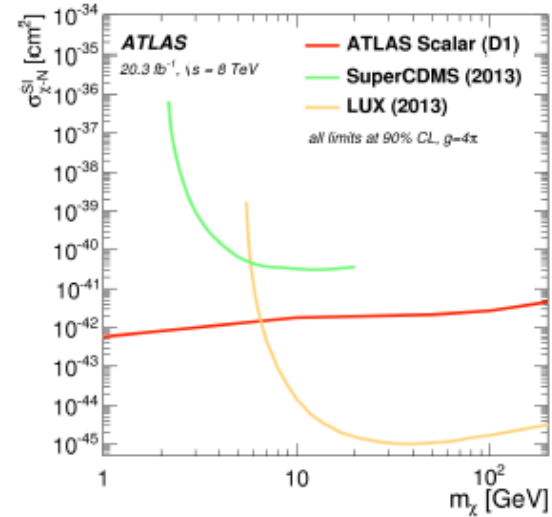
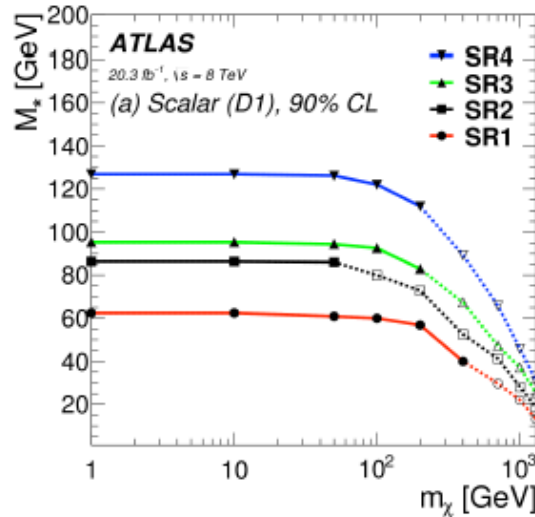
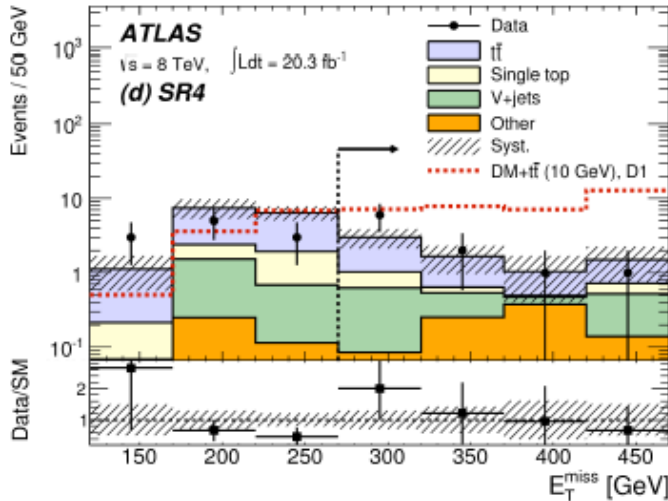
$$\mathcal{O}_{\text{scalar}} = \sum_q \frac{m_q}{M_*^N} \bar{q}q\bar{\chi}\chi$$

## Scalar operators/mediators can have explicit dependence on quark mass

- Motivated by minimal flavour violation
- Couplings to top quarks interesting!
- Signature “ $t\bar{t} + E_T^{\text{miss}}$ ” similar to SUSY stop

**$t\bar{t} + E_T^{\text{miss}}$**

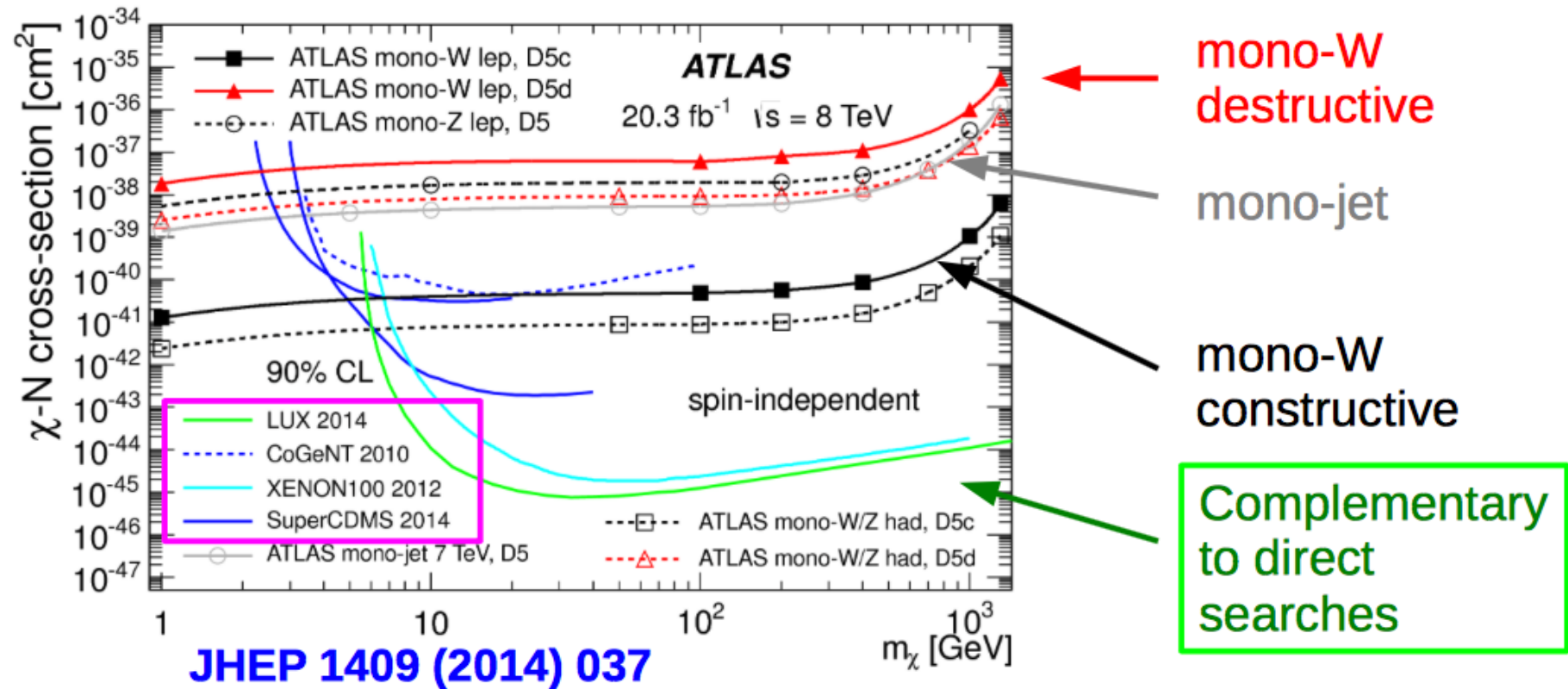
- at least 1 b-jet
- $E_T^{\text{miss}} > 270$  GeV
- jet  $p_T > 80, 70, 50, 25$  GeV
- b-jet  $p_T > 60$  GeV
- $\Delta\phi(E_T^{\text{miss}}, j_{1/2}) > 0.6$
- $m_T > 130$  GeV
- and other topological cuts





Various model considered	
D1	Scalar
D5c	Vector (constructive)
D5d	Vector (destructive)
D9	Tensor

- Limit depends on the model
  - Consider as many as possible
- In general best limit with mono-jet
  - **mono-W** very sensitive if **constructive interference**



by courtesy of G.Siragusa at LLWI 2016