

DM Searches at LHC

Hideyuki Oide

I n v i s i b i l e

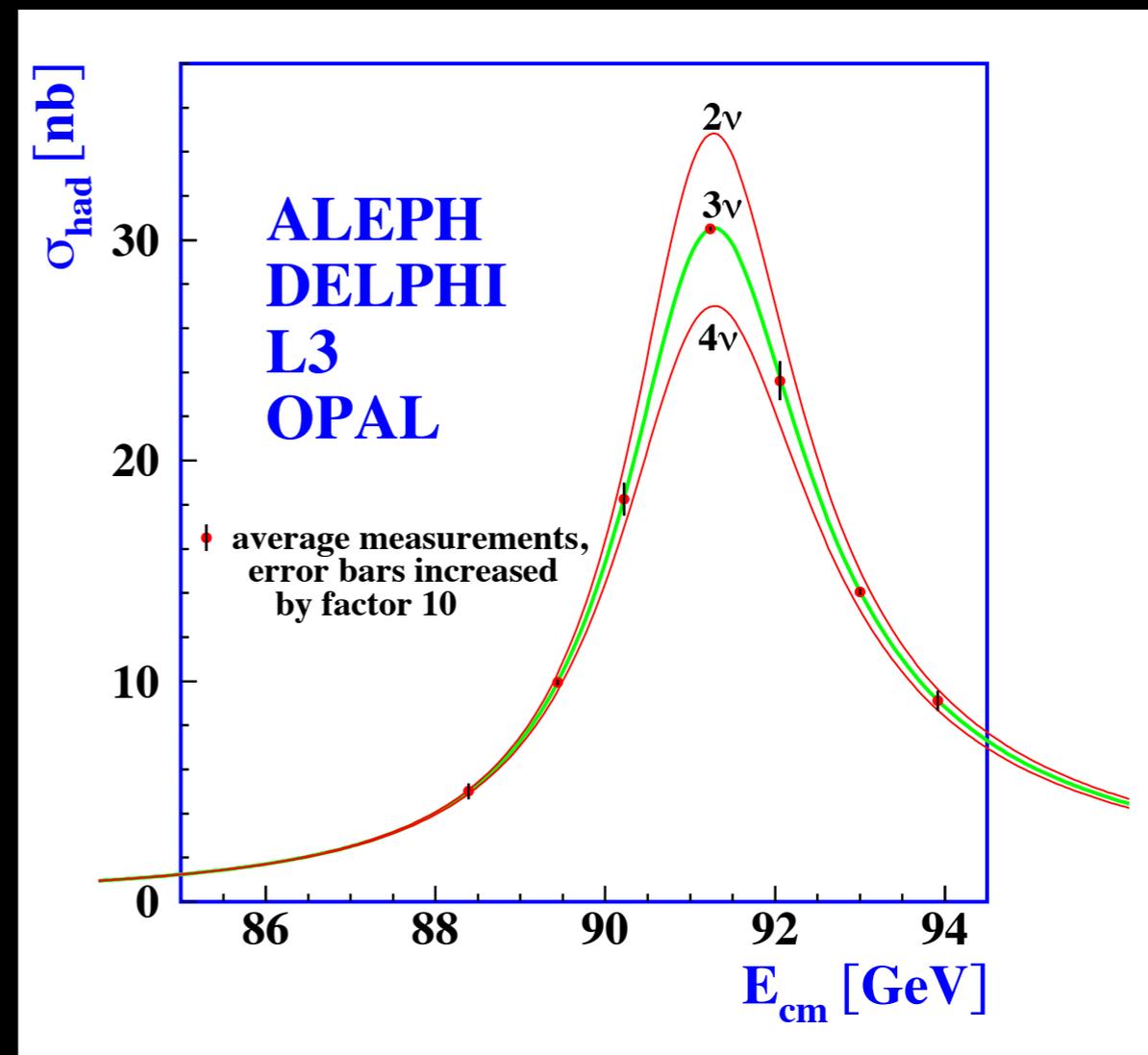
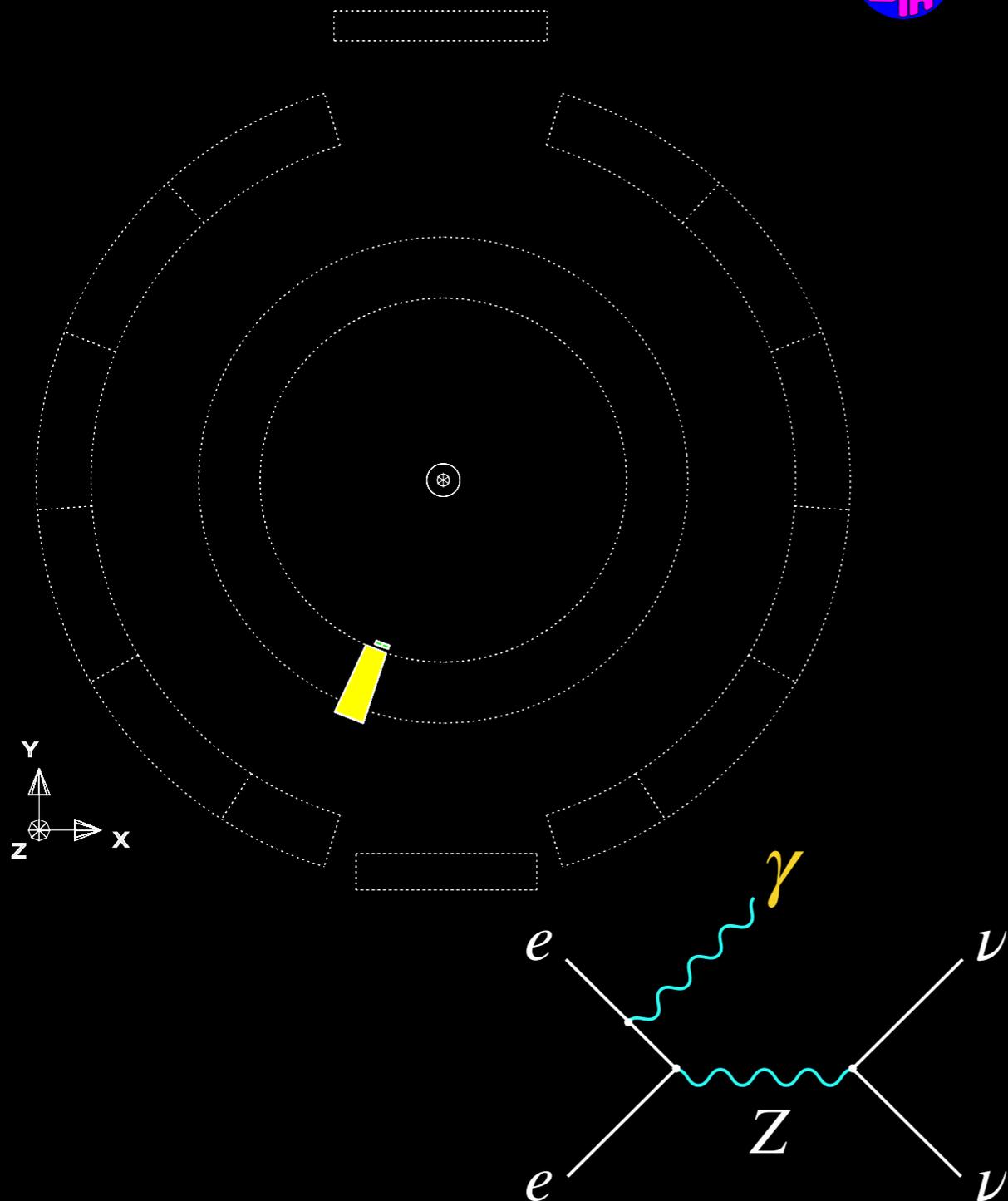
Archetype of “invisible at collision”



Run:event 2468: 66487 Ctrk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 4 SumE= 15.8)
 Ebeam 45.613 Vtx (-0.12, 0.12, 0.21) Hcal(N= 0 SumE= 0.0) Muon(N= 0)

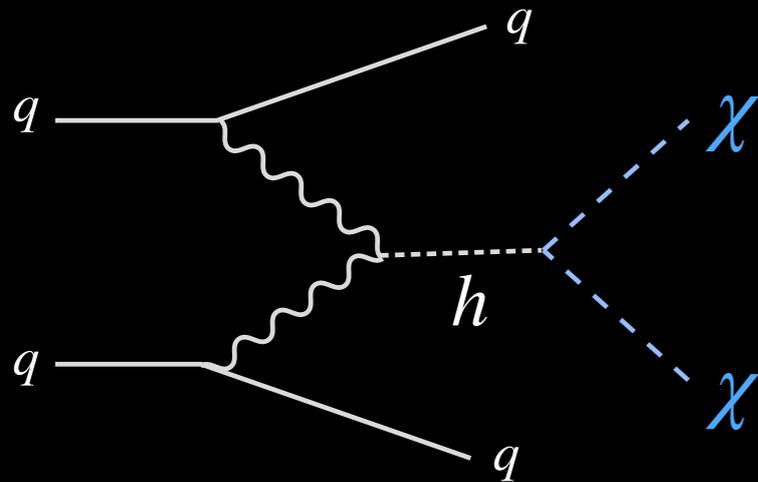


hep-ex/0509008



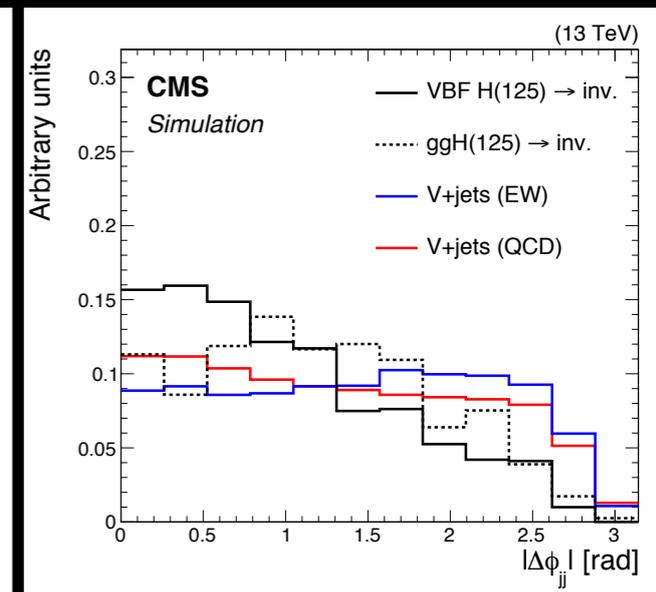
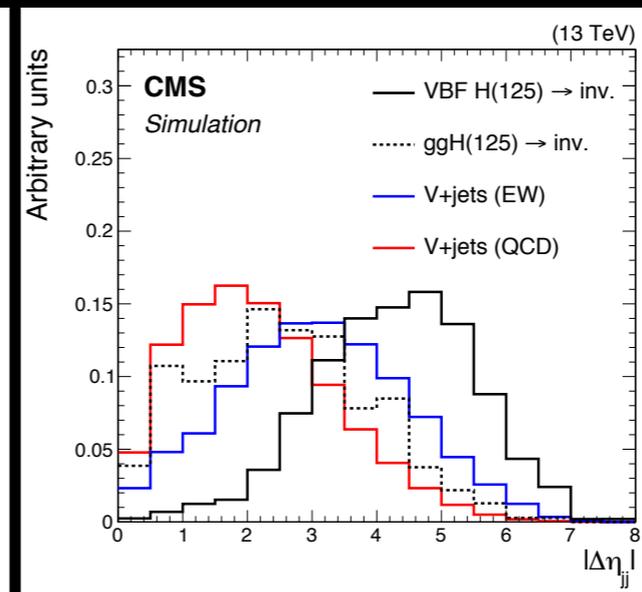
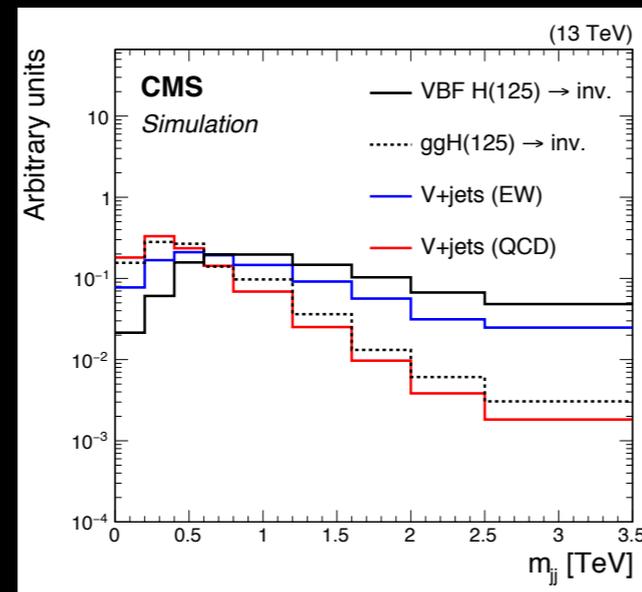
LEP1: 軽いニュートリノの世代数は「3」と決定
 LHCでのDM探索も「ノリ」は基本同じ

Higgs: yet another “invisible at collision”



- 生成断面積 : ggF 49 pb / VBF 3.8 pb / Vh 2.3 pb
- ggF → mono-jet like search: 感度悪い
- VBF → large-rapidity-gap jets: **最も感度が良い**
- Vh → mono-V like search

HIG-17-023 / arXiv:1809.05937



★ Selection

★ Jets:

$$p_{T,1} > 80 \text{ GeV}, p_{T,2} > 40 \text{ GeV}, |\eta| < 4.7$$

★ $E_T^{\text{miss}} > 250 \text{ GeV}$

★ $\Delta\phi(E_T^{\text{miss}}, j) > 0.5, \Delta\phi(j_1, j_2) < 1.5$

★ Veto γ, b, ℓ

★ SR

★ Shape fit: $m_{jj} > 200 \text{ GeV}, \Delta\eta(j, j) > 1.0$

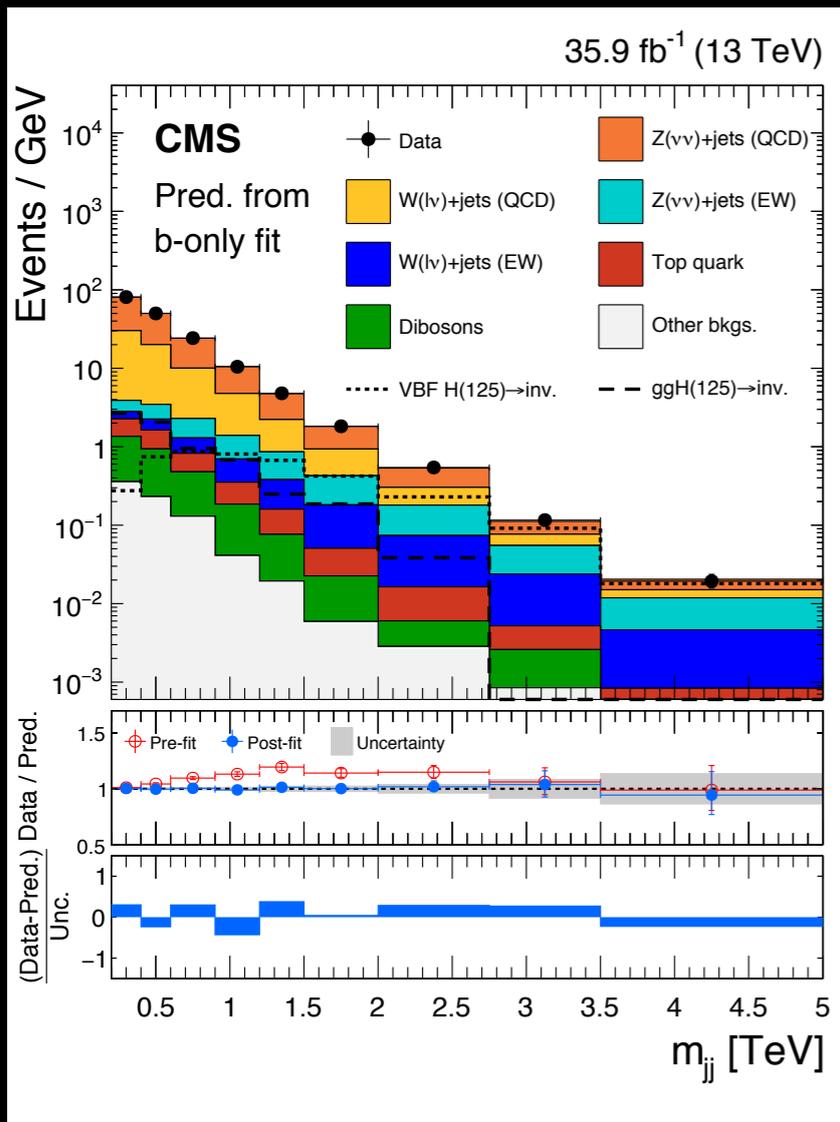
★ Cut&Count: $m_{jj} > 1.3 \text{ TeV}, \Delta\eta(j, j) > 4.0$

★ main BGs: QCD Z/W+jets w/ missing ℓ

Higgs: yet another “invisible at collision”



HIG-17-023 / arXiv:1809.05937

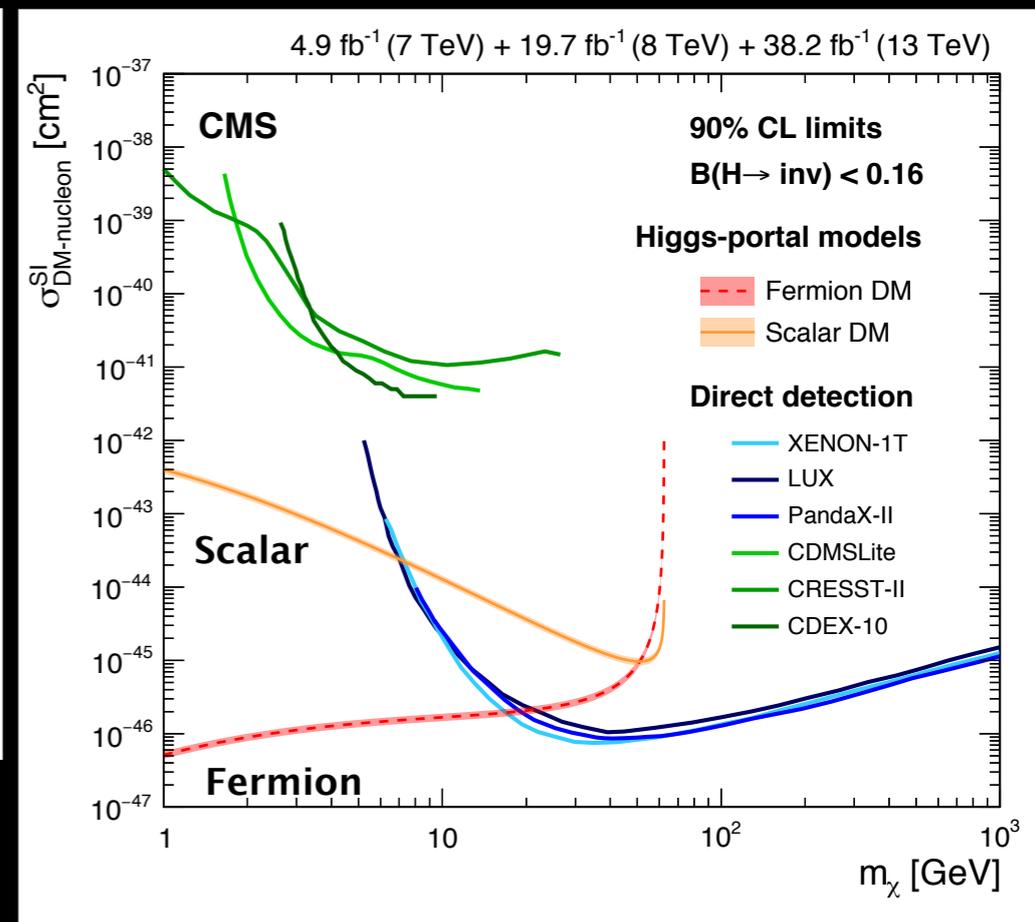
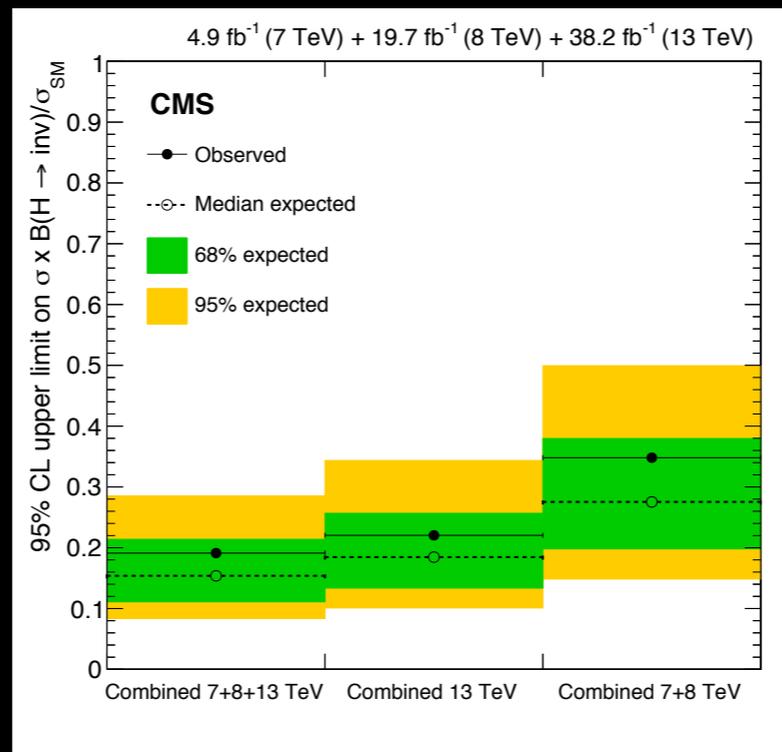


★ VBF: tagged by large rapidity-gap jets

★ $B(h \rightarrow \text{inv}) < 0.33_{\text{obs}} (0.25_{\text{exp}})$ (95 % CL)

★ CMS: 7, 8 TeV + 13 TeV (2016) combination

★ All of VBF, Vh, ggF: $< 0.19_{\text{obs}} (0.15_{\text{exp}})$



Higgs portalに強い制限

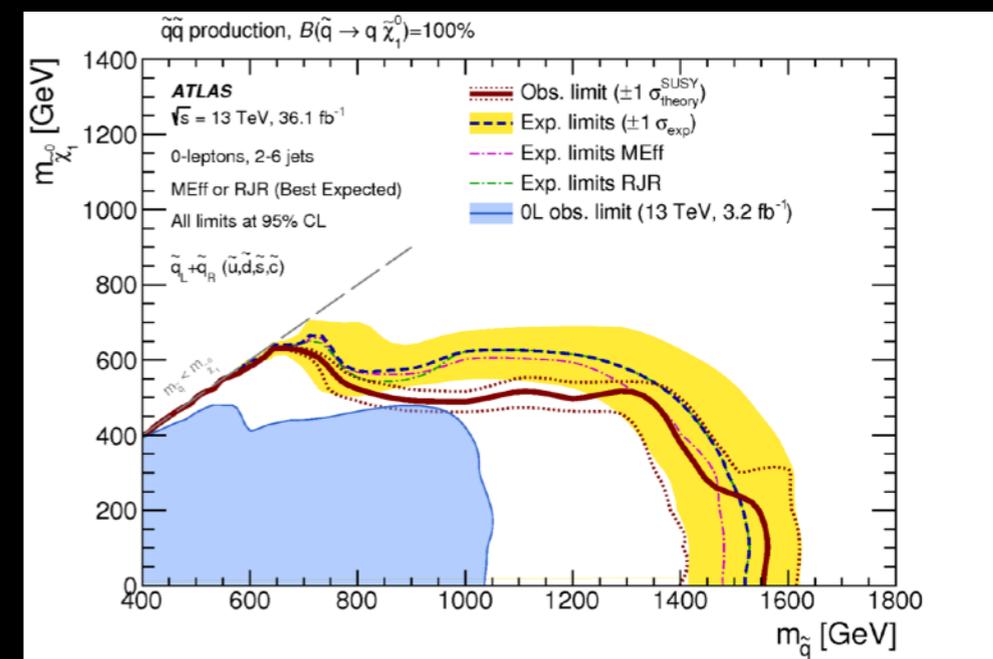
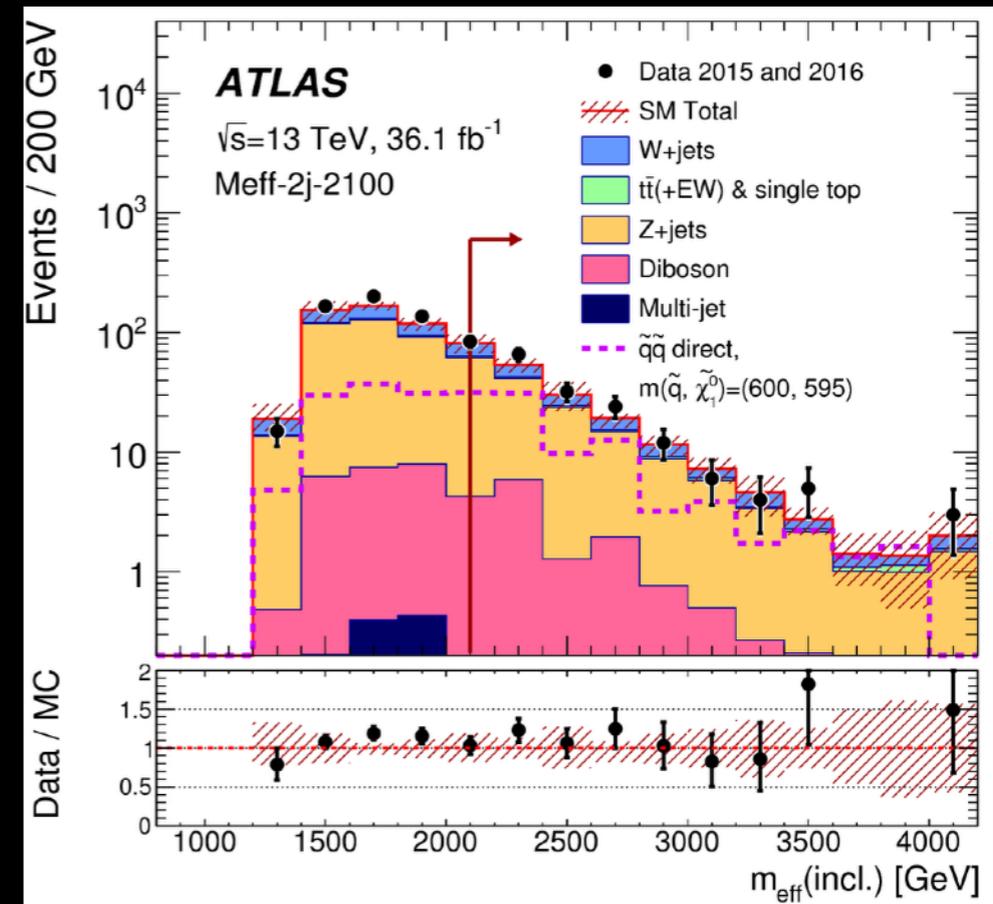


- ★ ダークマターはどこにでもあるのに目に見えなくてとっても不思議.
- ★ お空に浮かんでいるDM ($\Omega_\chi h^2 \sim 0.12$) には**主成分**があり,
それが thermal freeze-out で残ったものと思うと,
DMとSMのあいだには**何らかの相互作用**があってしかるべき.
→ WIMP: $\langle\sigma v\rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$
- ★ SMにはWIMP-DMに**対応する粒子の候補**がない!
→ BSMの存在を強力に支持している
→ 「古典的」には: RPC-SUSY, neutral LSP, WIMP
- ★ 具体的なDM-SM相互作用がわからなくても,
とにかくエネルギー・リーチさえあれば**LHCでDMの生成ができる**可能性がある
→ 探してみないと, あるかないかはわからない

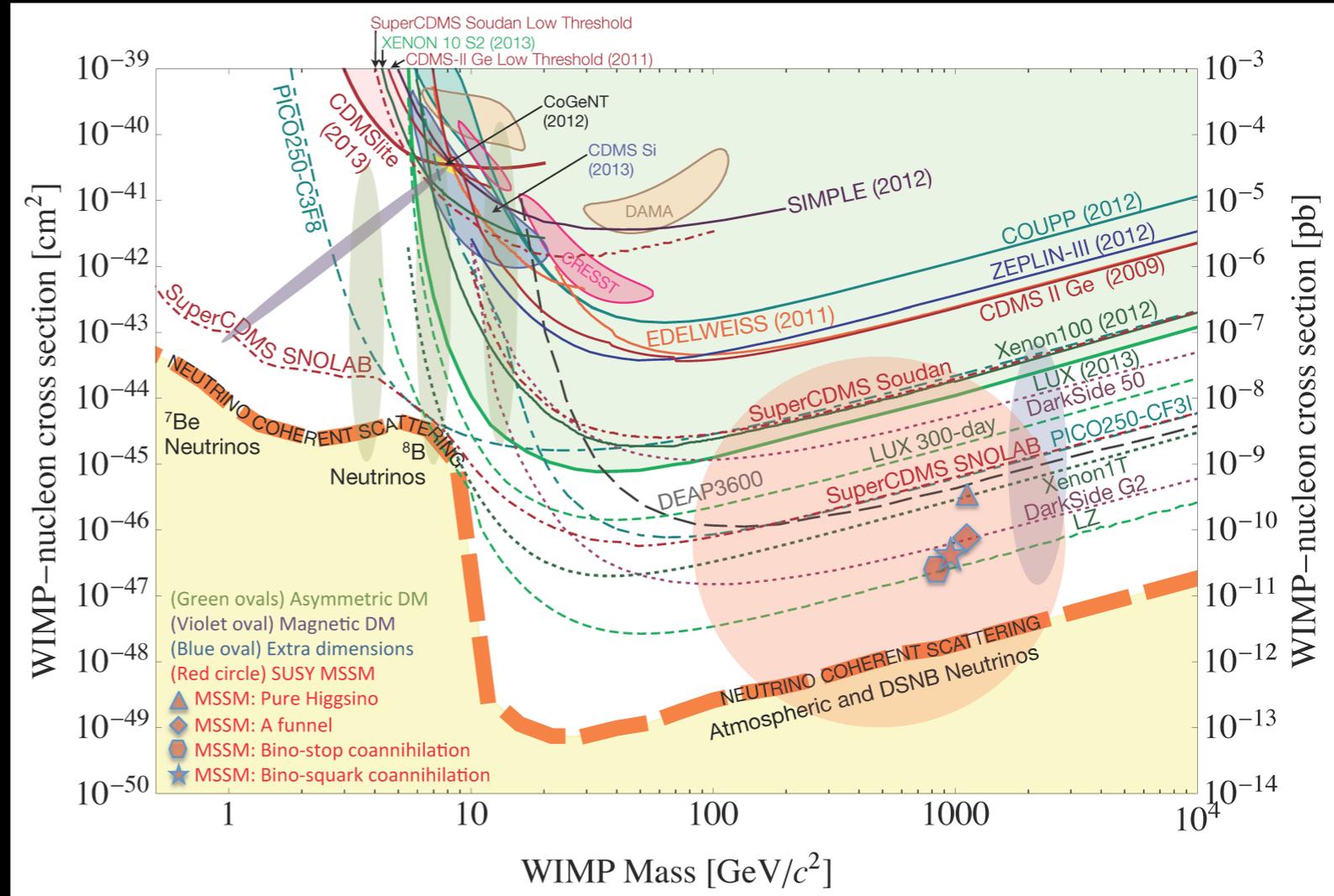
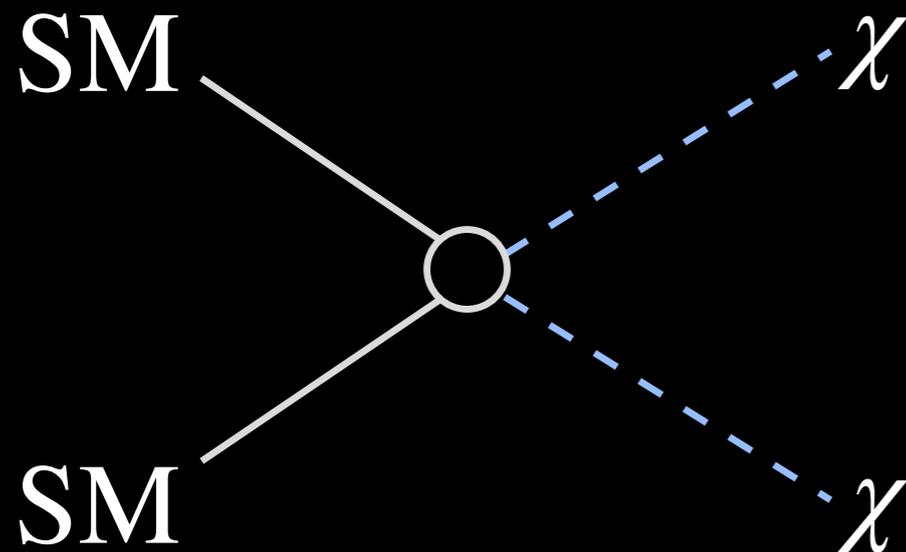
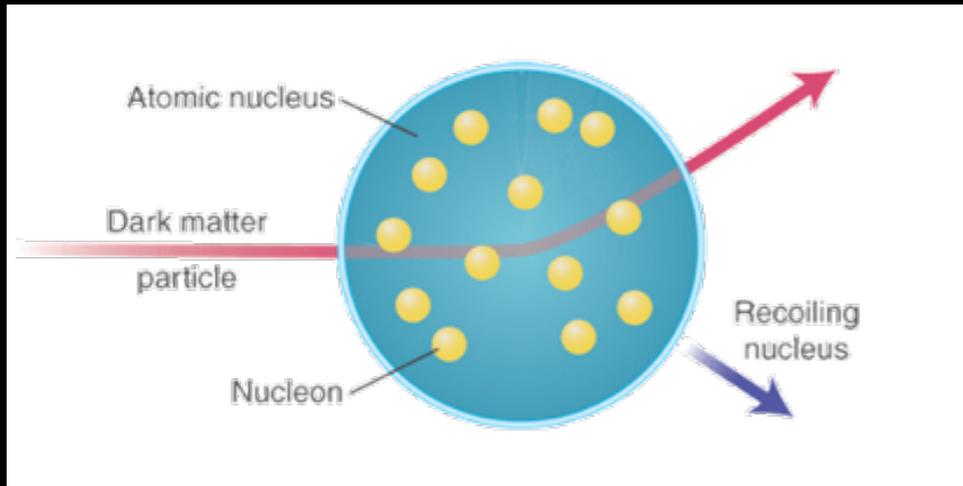
SUSYが見つからない→信仰の墮落？



- ★ (以下は想像のダイアログ)
- ★ 「SUSYがあるはずだと思っていままで頑張って探してきたけど、**全然見つからないじゃん！！**」
- ★ 「でもさ、**SUSYはなくてもきっとDMはあるはずだ**よね。お空には漂っているってみんな言ってるし」
- ★ 「正直DMが作れるなら、**SUSYじゃなくてもいいんじゃないの？**というか俺は正直何でも良い。そういうのは見つかったから調べれば良いから」
- ★ 「というか本当にSUSYしかないの？**SUSYばかり探していたせいで見落としてた**ってことはないの？」
- ★ 「とりあえず**SUSYなんか一旦忘れて**、DMをLHCで作るための最小限の仮定でスタートしてみたら？」



単純な仮定から出発するのだ



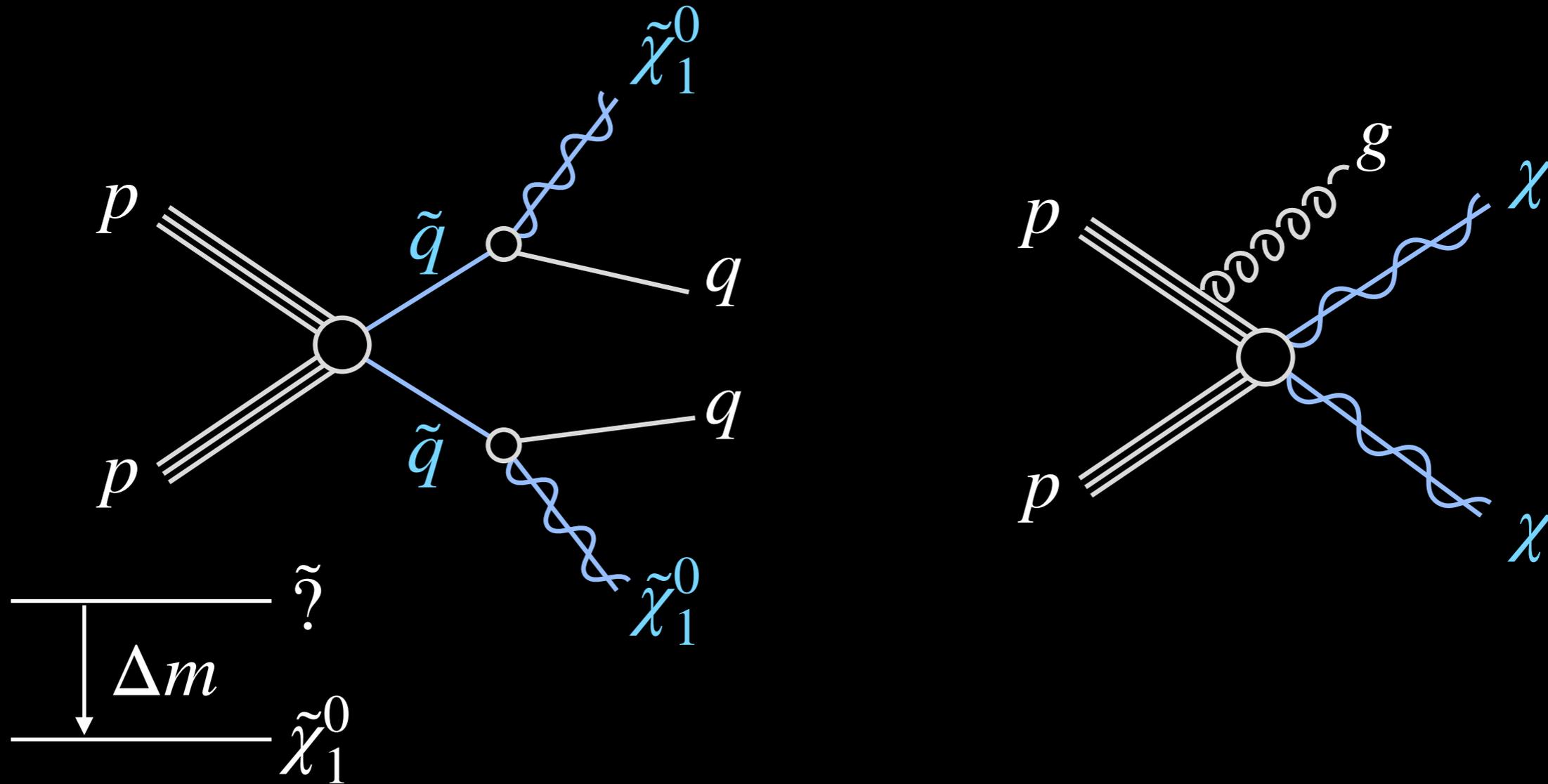
- ★ DMがSMとどう相互作用するかわからないが、WIMPなので**きっと何か相互作用があるはず**。
- ★ 弾性散乱の過程を裏返せば**SMからDM pairを作る過程が作れる**。



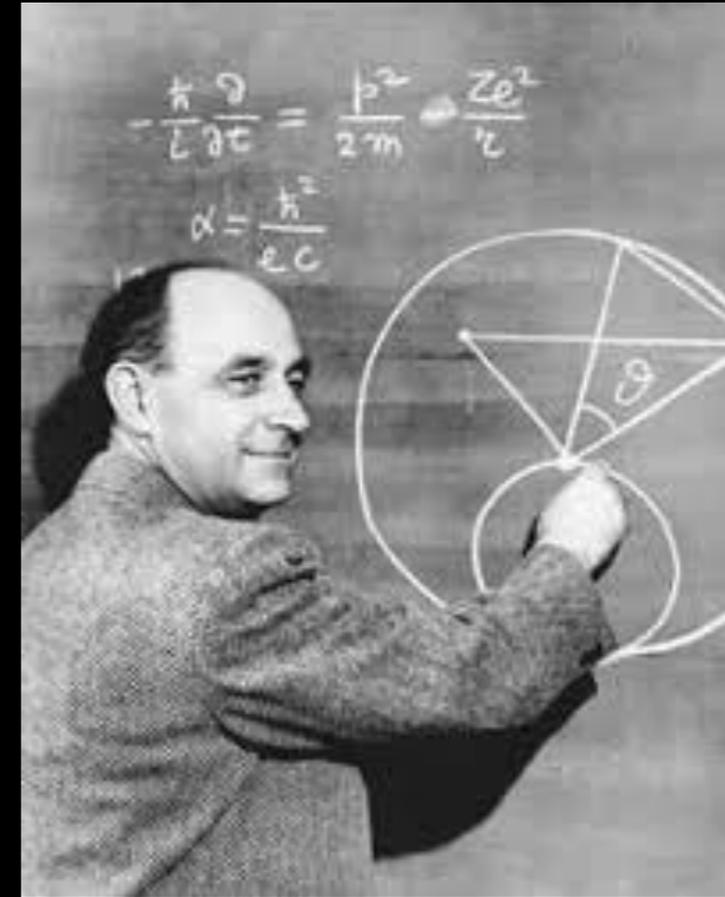
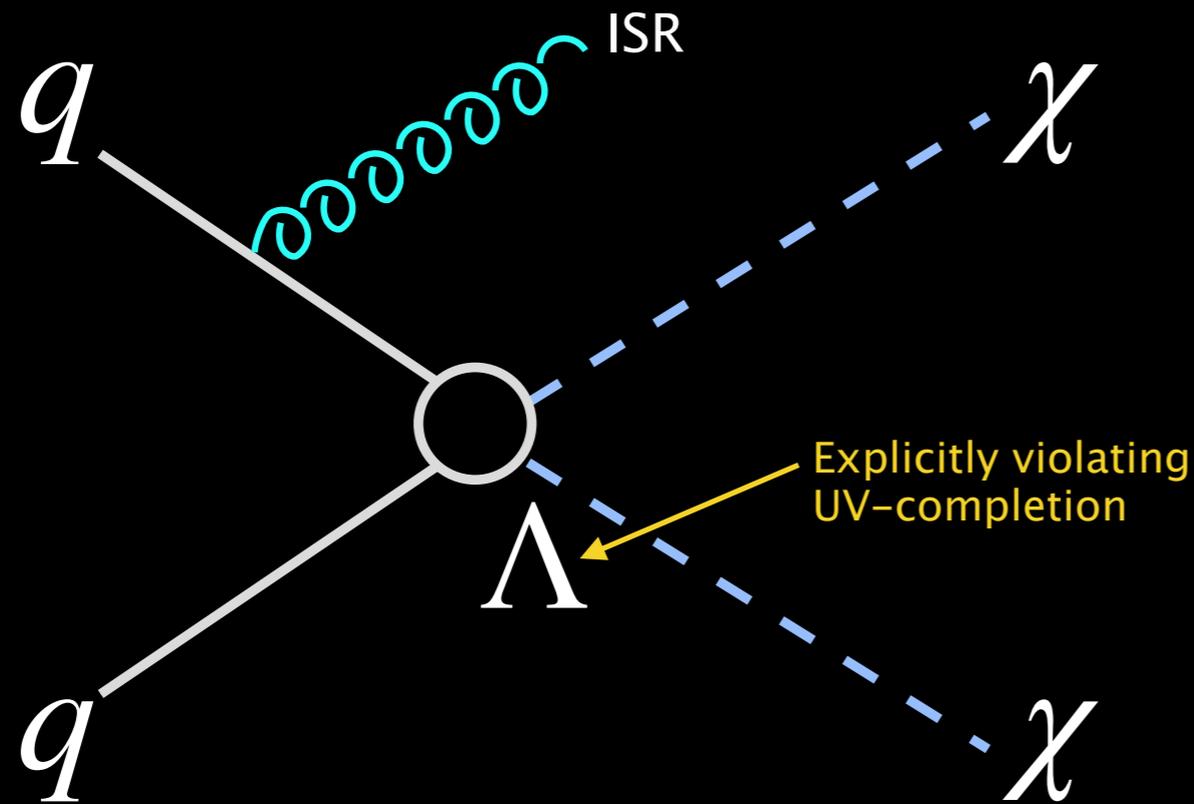
- ★ ざっくりいうと...
- ★ DMがLHCで何らかのメカニズムで**ペア**でできることを仮定する
- ★ DMはコライダー検出器で捕まらないので**MET**として見えるはず
 - MET分布に異常が見つければDM（かinvisibleなんでも）の兆候といえる
- ★ でも何かrecoilがないと**イベント**を特徴づけるものがなくて困る...
ISR-jetみたいに**ダイアグラム**に書き足す
- ★ recoilは「何でも良い」：j, γ , W, Z, t, b, h, tt, bb...

「アテナイの学堂」





- ★ 基本的に「**SUSY探索**」はLSP以外のsparticle（例：スクォーク）がペアで生成することを想定して、LSPに落ちる「**ギャップ**= Δm 」と「 E_T^{miss} 」をsignatureの投げり所として探索（例： m_{T2} ）。
- ★ 「**DM探索**」はcascade decayにはこだわらず、もっと**直接的に**LSP=DMを作るプロセスを一般的に考えようとする。ただしそのままではイベントに探索の特徴が見えないので、何か**ヒゲ**を生やす。



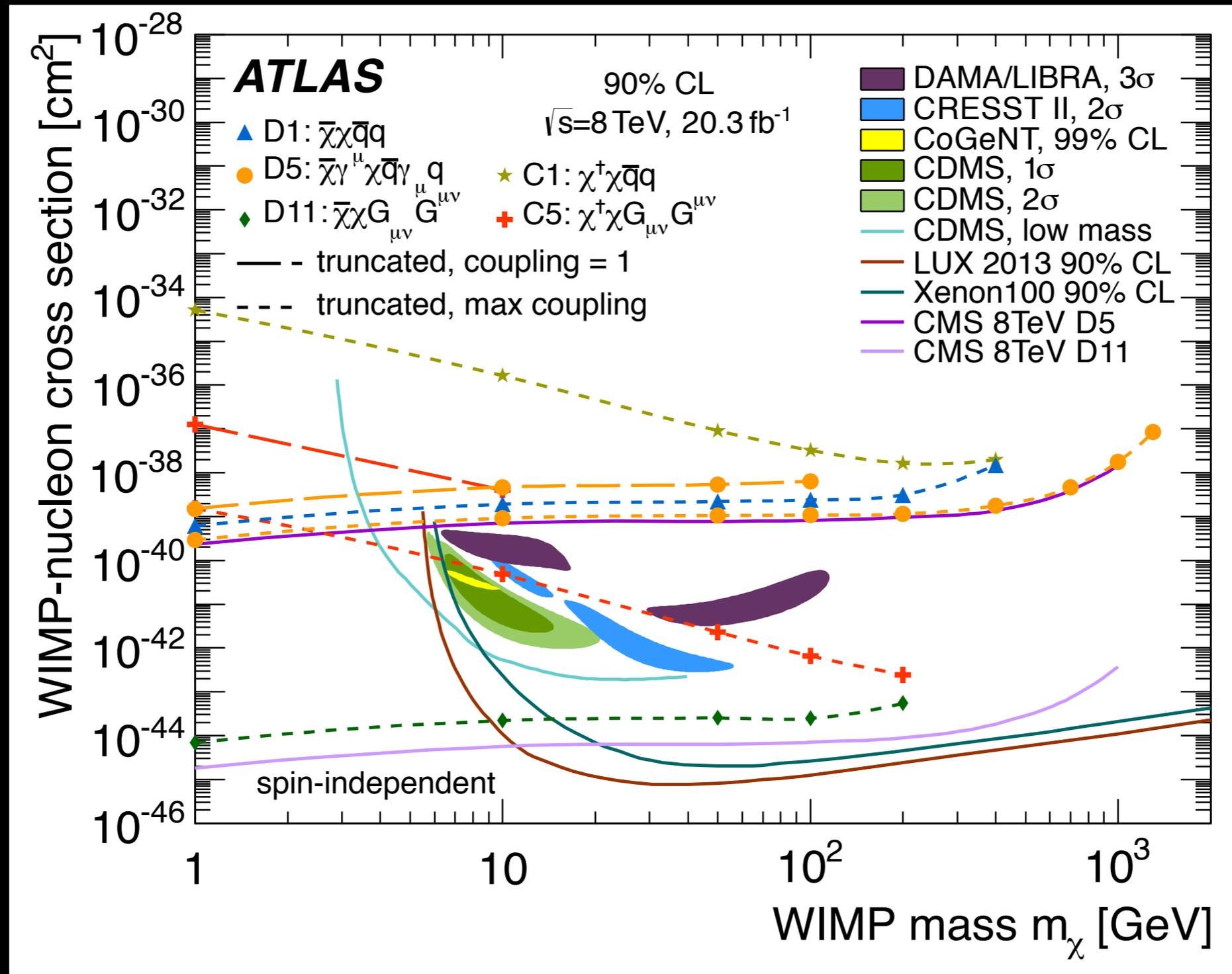
- ★ à la Fermi interaction
 - effective theory valid up to the unknown suppression scale Λ .
- ★ The most model-independent approach.



	Name	Initial state	Type	Coupling
Scalar DM	C1	qq	scalar	$\frac{m_q}{\Lambda^2} (\chi^\dagger \chi) (\bar{q}q)$
	C5	gg	scalar	$\frac{1}{4\Lambda^2} (\chi^\dagger \chi) \alpha_S (G_{\mu\nu}^a)^2$
Dirac Fermion DM	D1	qq	scalar	$\frac{m_q}{4\Lambda^3} (\bar{\chi}\chi) (\bar{q}q)$
	D5	qq	vector	$\frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu \chi) (\bar{q}\gamma_\mu q)$
	D8	qq	軸性vector	$\frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu \gamma^5 \chi) (\bar{q}\gamma_\mu \gamma^5 q)$
	D9	qq	tensor	$\frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\chi}\sigma^{\mu\nu} \chi) (\bar{q}\sigma_{\mu\nu} q)$
	D11	gg	scalar	$\frac{1}{4\Lambda^3} (\bar{\chi}\chi) \alpha_S (G_{\mu\nu}^a)^2$



arXiv:1502.01518



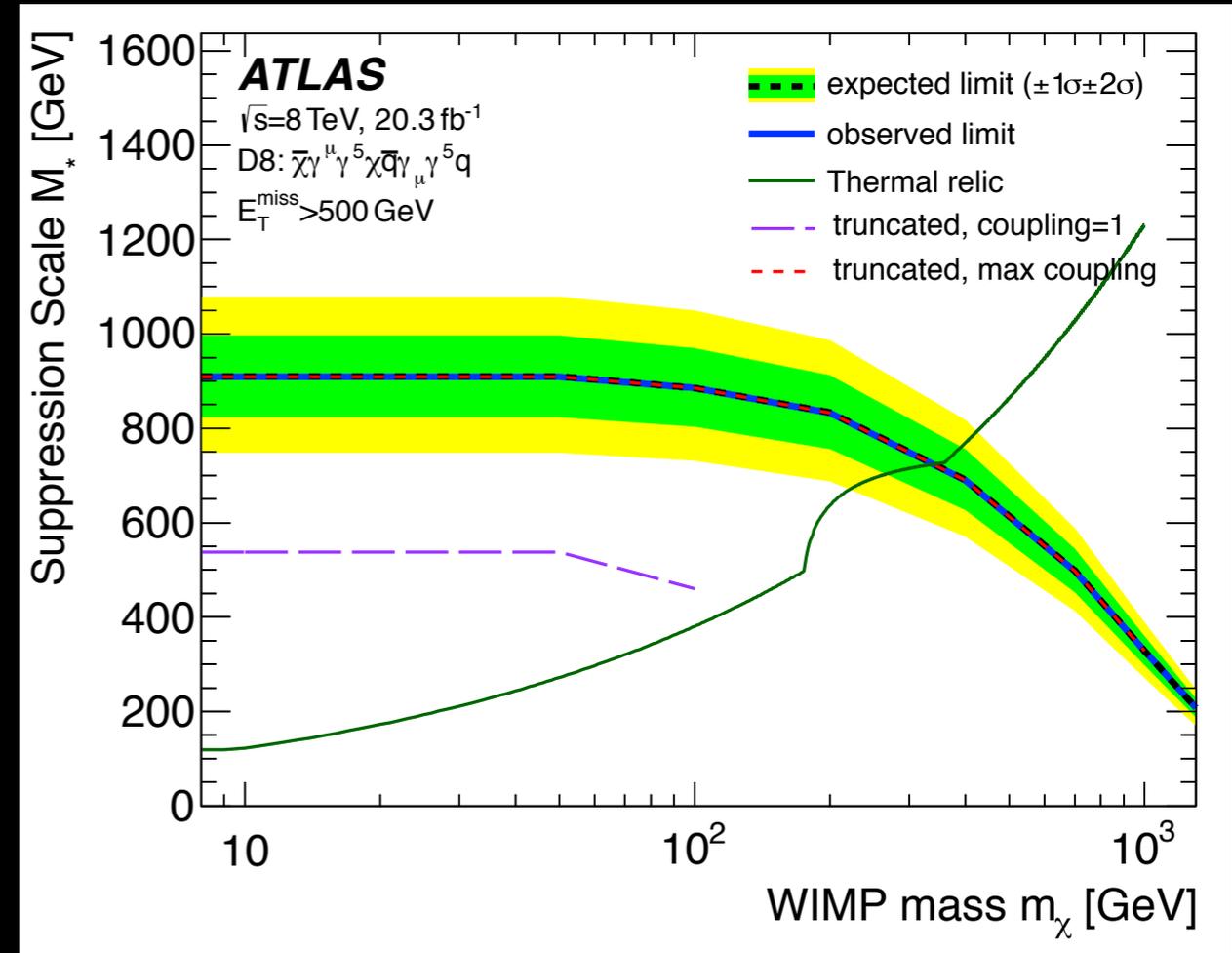
submitted 2015.5



EFTの何がいけないの？

arXiv:1502.01518

- ★ EFTは分解能（運動量移行 q_{tr} ）が Λ を上回ると有効性を失う（地下実験のDDではこの条件は満たされている）
- ★ EFTにはパラメータが2個しかない。
LHCで探索している Λ の感度範囲は概ね対応する断面積で決まる。
- ★ 一方で $q_{tr} \gtrsim \Lambda$ となるイベントはたくさんある。そのようなイベントを排除した信号領域だけ取り出して見ればEFTはなお有効ではあるが、高エネルギーのイベントにこそ新物理があってほしい...
- ★ だから $q_{tr} \gtrsim \Lambda$ となるようなイベントでも、きちんと解釈できるようなモデルがほしい。



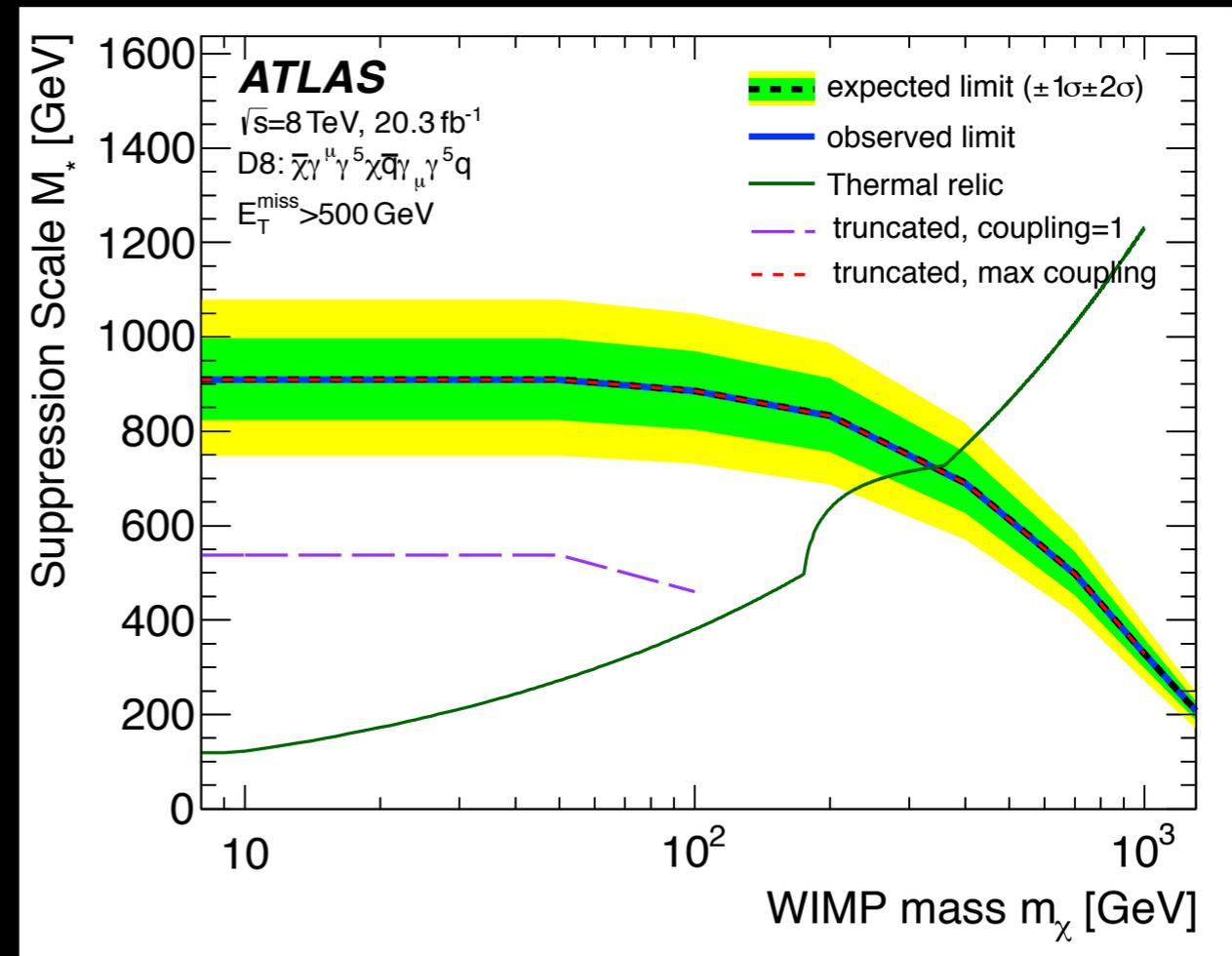
EFTでintegrate-outできない、相互作用の具体的な中身を設定しないとsensibleな絵にならない！

EFTの何がいけないの？

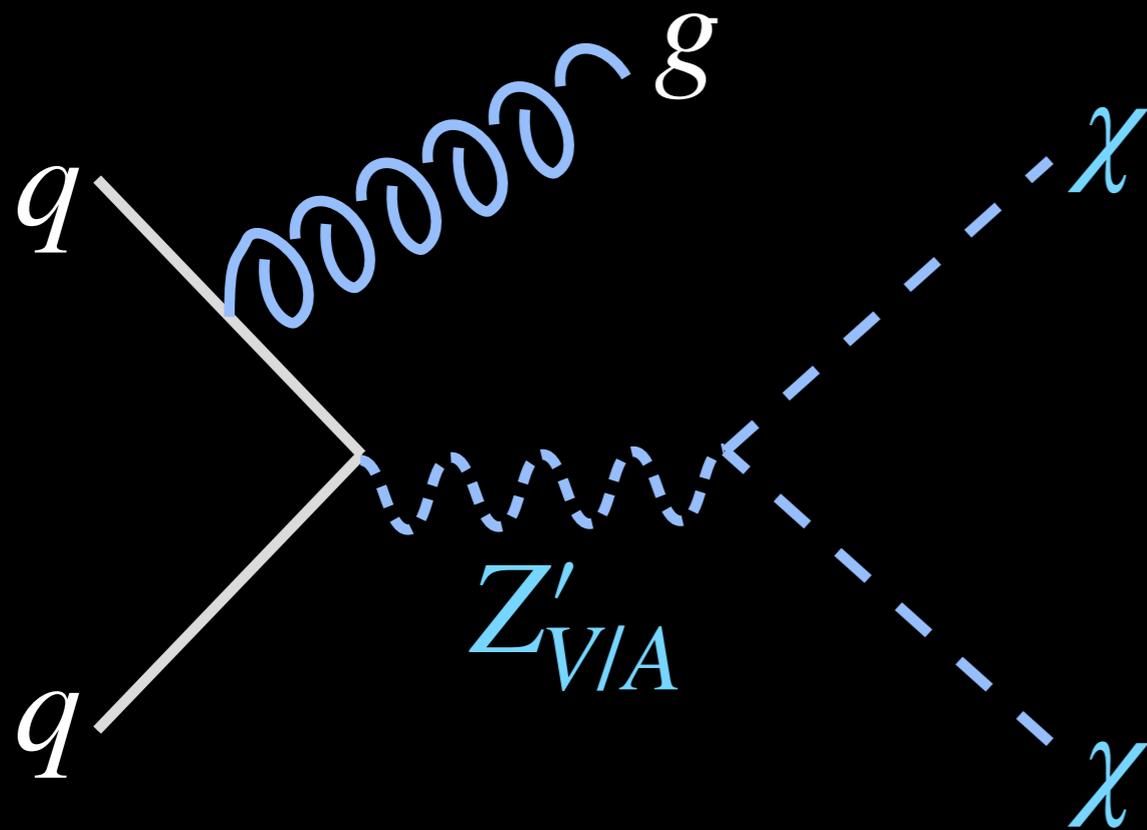


arXiv:1502.01518

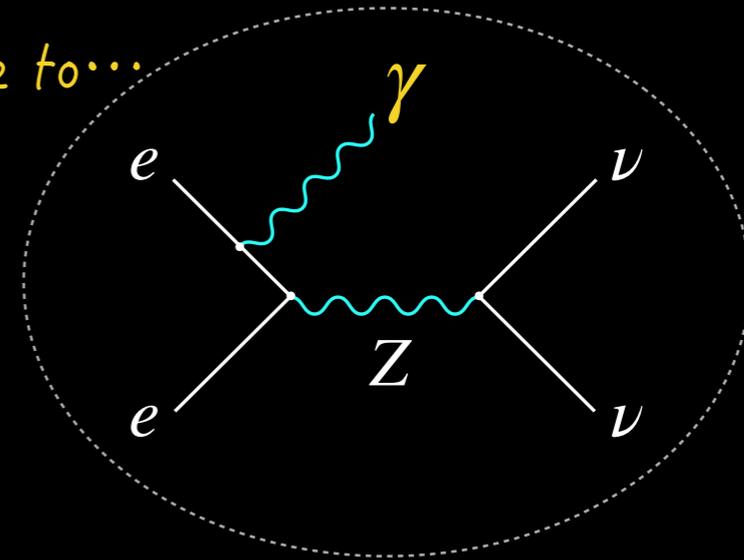
- ★ このリミットをもっと具体的なDMシナリオに簡単に再解釈できないので使い勝手が悪い.
- ★ Λ が十分大きく保ったまま断面積が稼げればEFTはなお有効にできる.
→ Coupling $g_q g_\chi$ を大きく取れば良い
- ★ しかしやりすぎるとユニタリティを壊すので、結局限界がある.
- ★ 大きい Λ は重たいmediatorの存在を示唆するが、あまり重たすぎるとrelic abundanceを実現するのはtricky.



EFTでintegrate-outできない、相互作用の具体的な中身を設定しないとsensibleな絵にならない！



in homage to...



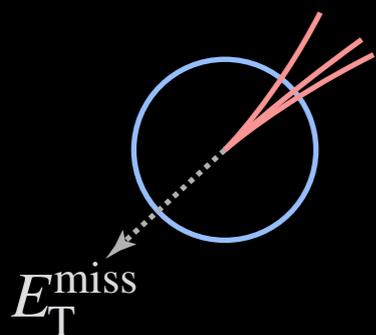
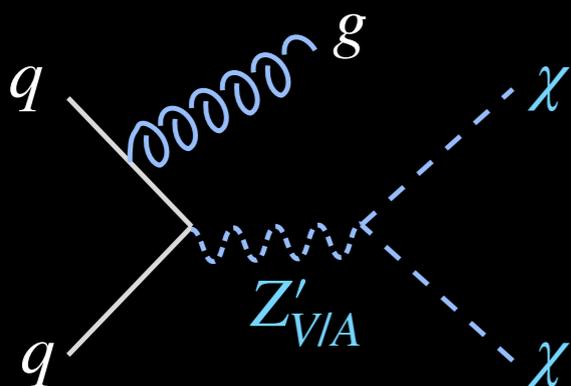
Vectorなら : EFTの $\frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\chi) (\bar{q}\gamma_\mu q)$

軸性Vectorなら : EFTの $\frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi) (\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5 q)$

- ★ Suppression scaleの代わりに何か **mediator** を頭に入れてみるのだ
- ★ とりあえず DM は Dirac fermion だとしておくのだ (Majoranaでもあんまり変わらないのだ)
- ★ 通常, mediatorの幅は必要最小限に留める (minimal width assumption)
- ★ 少ないパラメータで**簡単に**event generatorを作れる→リミットが引きやすい
- ★ 発想としてはbottom-up. これ自身は理論的に「〇〇であってほしい物理」にinspireされているわけではなく, 様々なDM-pheno modelsに対して**再解釈の適用性**がなるべく広くなるように作られている.
- ★ 一見, EFTに対して最小限の拡張をしているように見える...

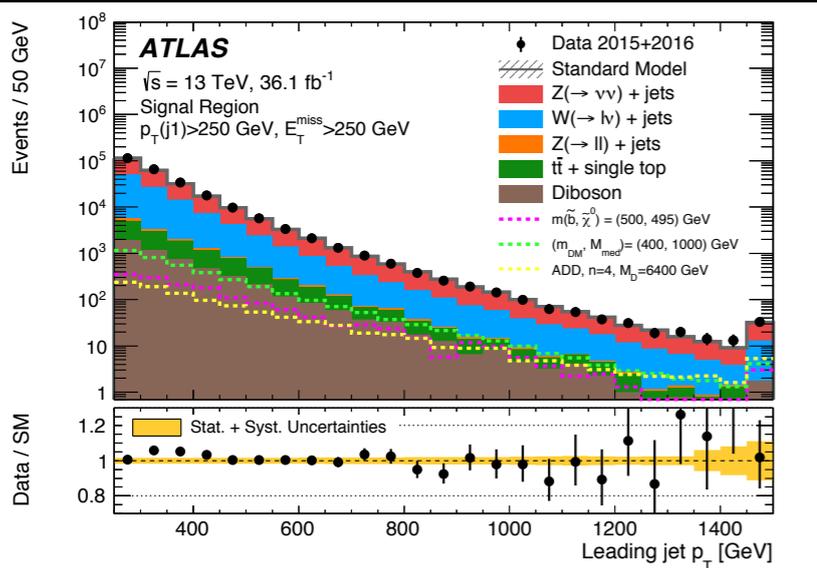


mono-j

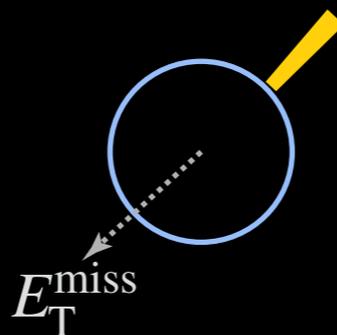
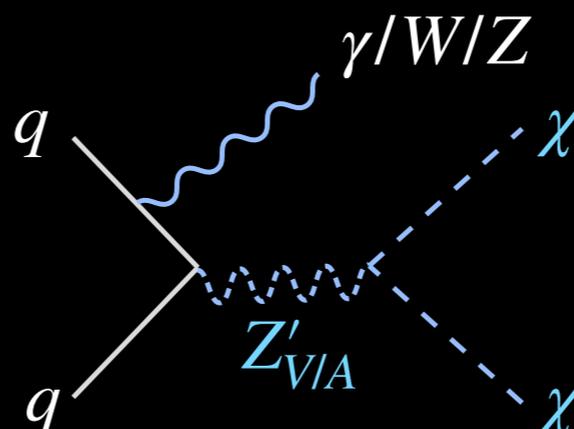


mono-j

EXOT-2016-27

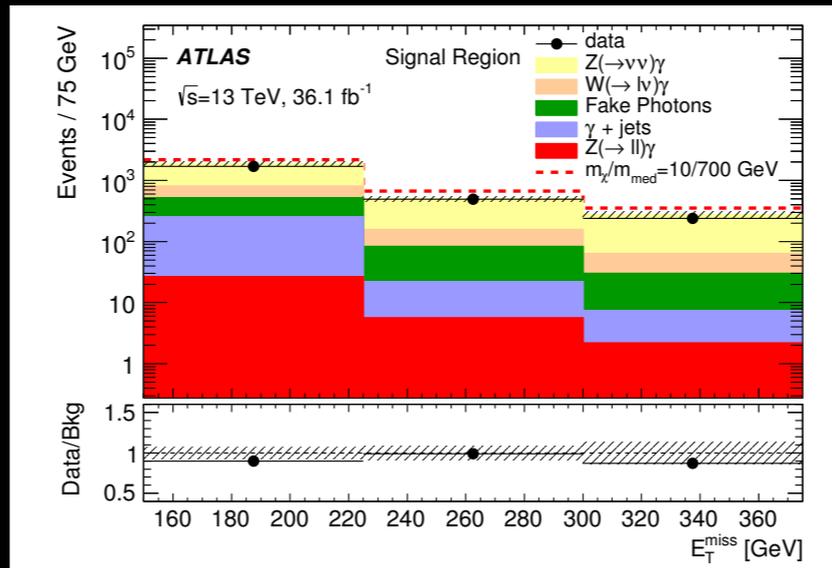


mono-V



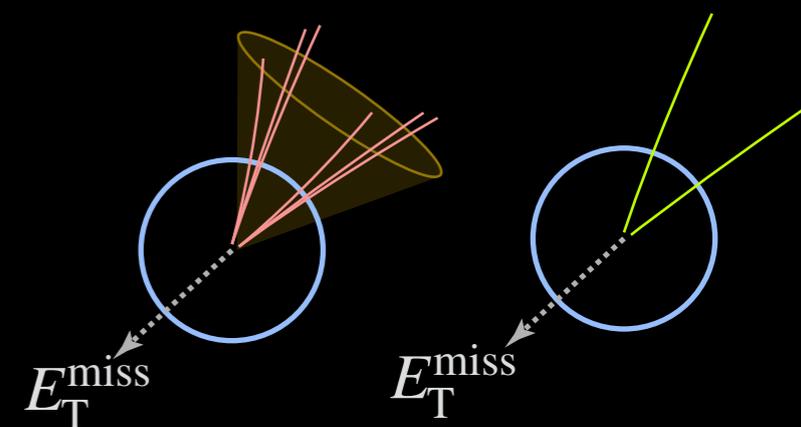
mono-γ

EXOT-2016-32

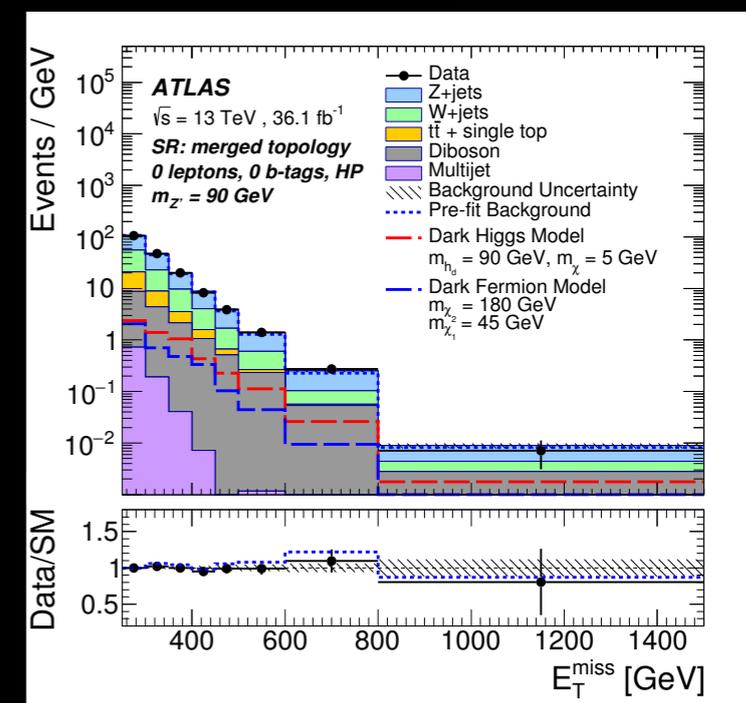


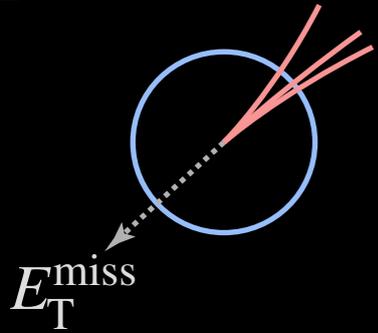
mono-V_{had}

mono-Z_{lep}

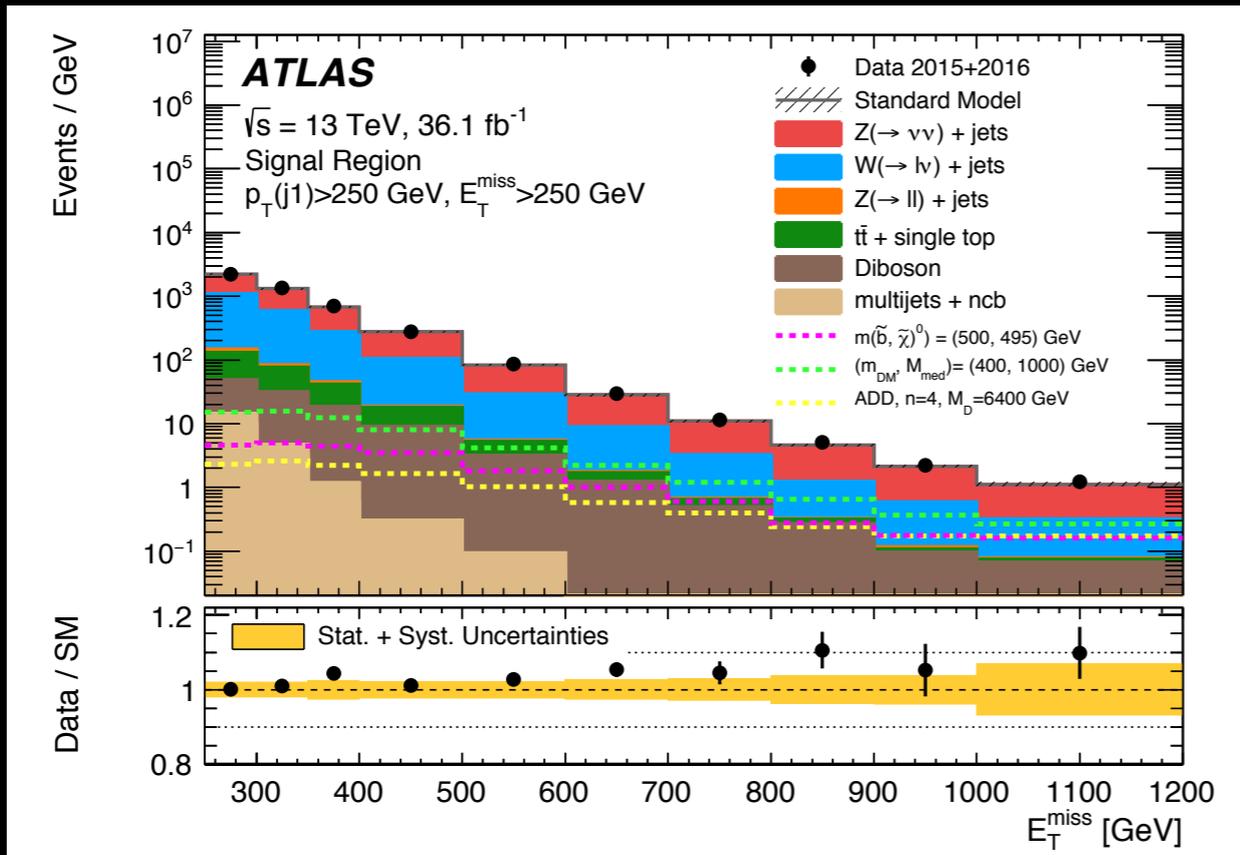


EXOT-2016-23

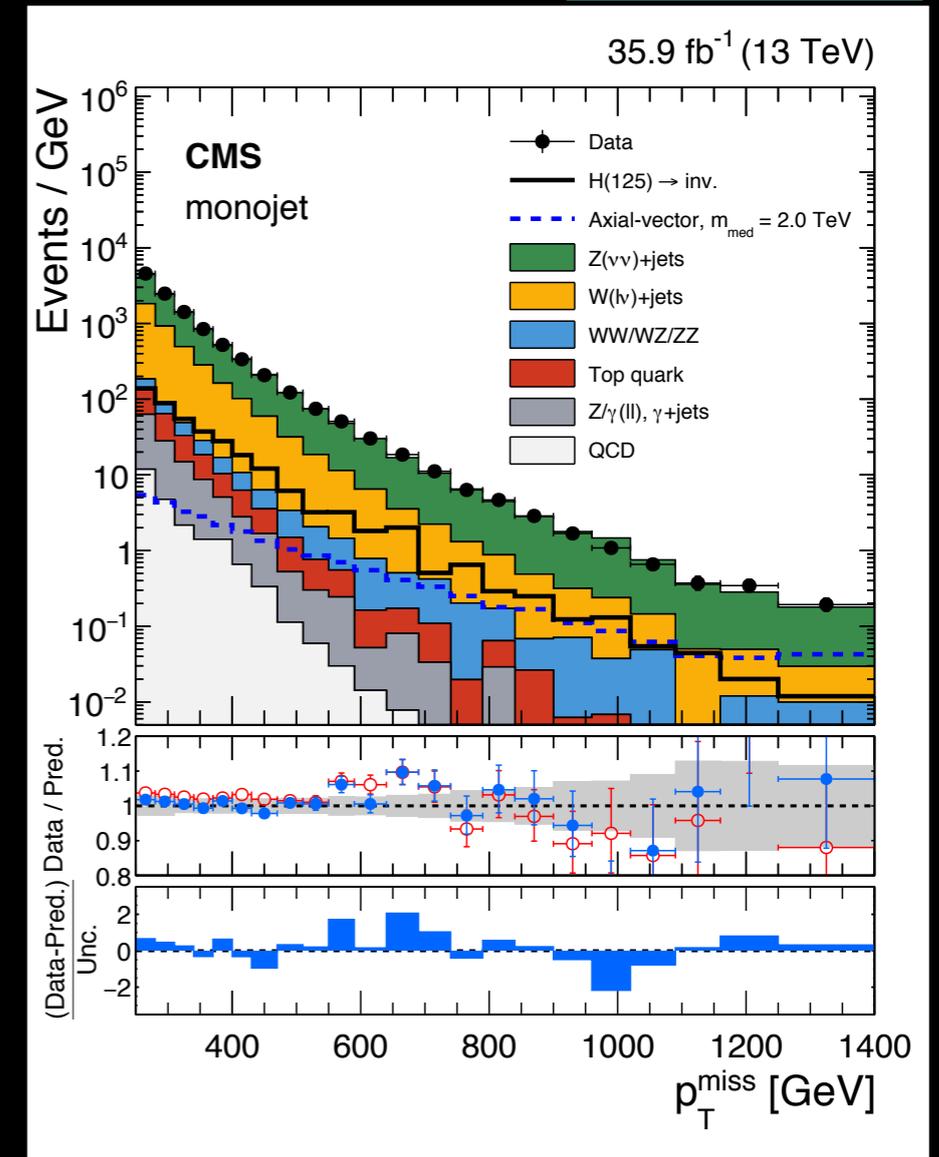




ATLAS-EXOT-2016-27



CMS-EXO-16-048



★ “mono-jet”という名前がついているが $N_{\text{jet}} \geq 1$ も許容されている。

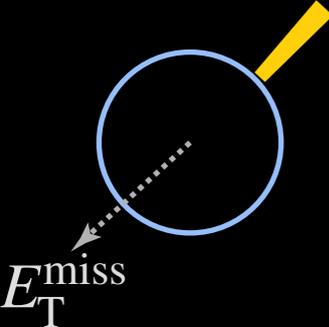
★ Dominant bkg: Z($\nu\nu$) + jets, W($\ell\nu$) + jets, $t\bar{t}$, dibosons

★ ATLAS Signal selection

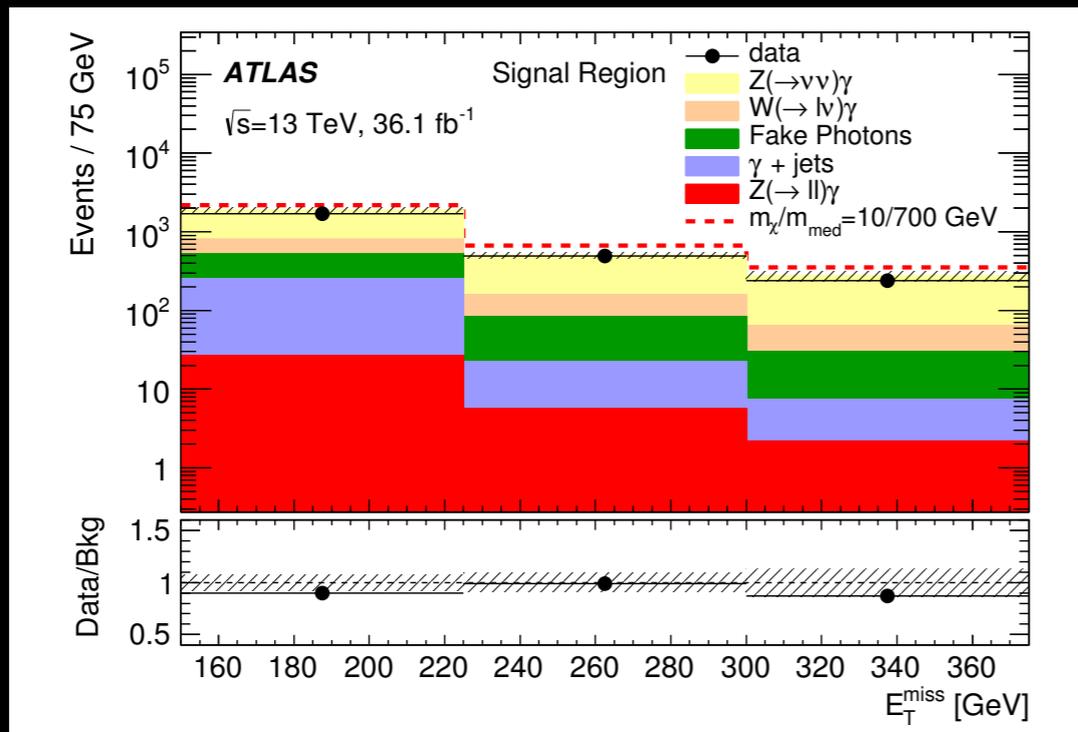
- ★ E_{T}^{miss} trigger; offline $E_{T}^{\text{miss}} > 250 \text{ GeV}$
- ★ Leading jet: $p_{T} > 250 \text{ GeV}$ & $|\eta| < 2.4$
- ★ Accepting up to 4 jets:
 $p_{T} > 30 \text{ GeV}$ & $|\eta| < 2.8$; $\Delta\phi(\vec{p}_{T}^{\text{miss}}, j_i) > 0.4$
- ★ Lepton veto

★ CMS Signal selection

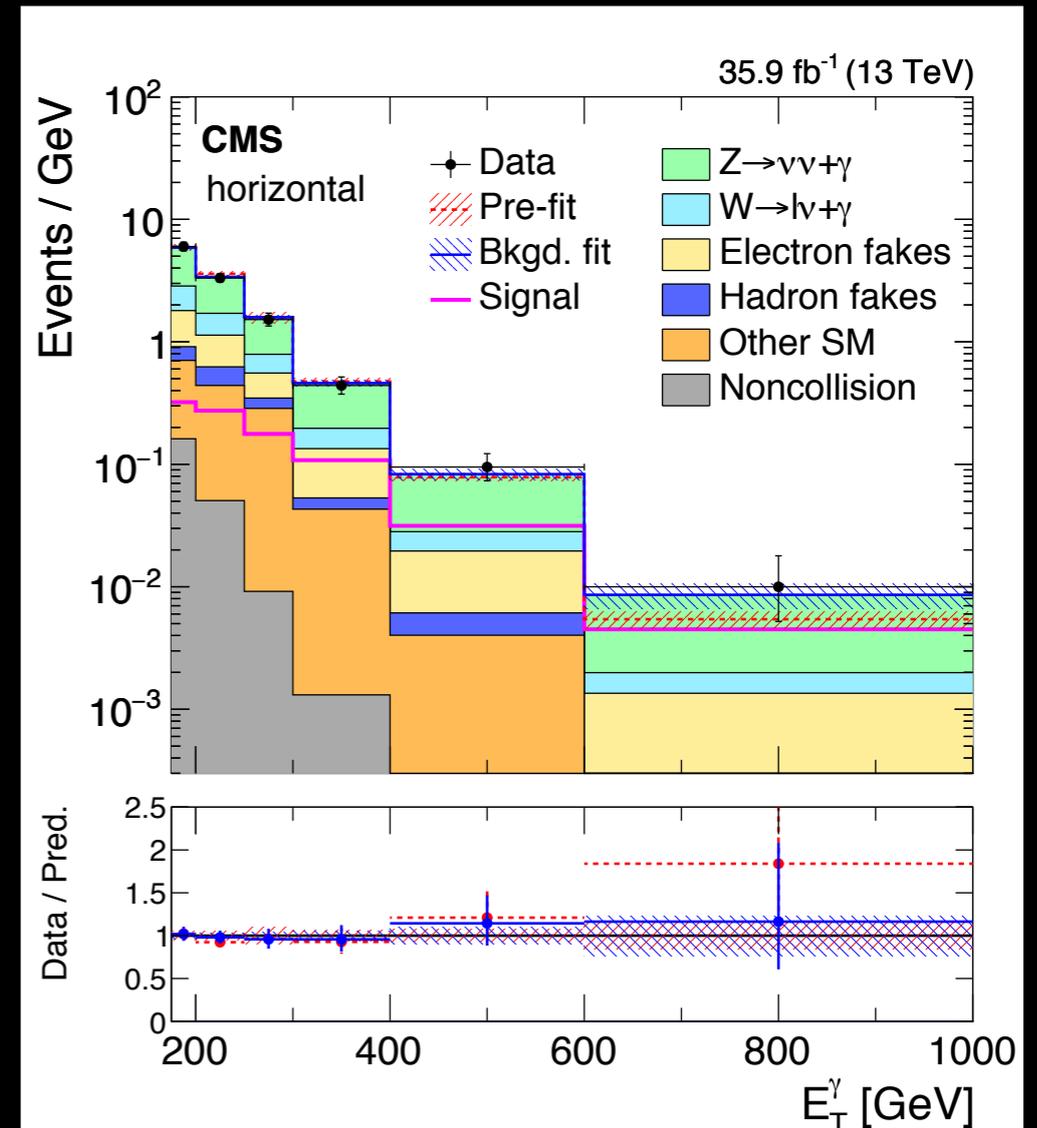
- ★ E_{T}^{miss} trigger; offline $E_{T}^{\text{miss}} > 250 \text{ GeV}$
- ★ Leading jet: $p_{T} > 100 \text{ GeV}$ & $|\eta| < 2.5$
- ★ Lepton veto
- ★ Veto “mono-V” events ($R = 0.8$ jet $p_{T} > 250 \text{ GeV}$; 2-prong substructure; $m_j \sim m_{W/Z}$)



ATLAS-EXOT-2016-32



CMS-EXO-16-053



★ Dominant bkg: Z($\nu\nu$) γ , W($\ell\nu$) γ , fake- γ

★ ATLAS Signal selection

★ Photon trigger; Good-quality leading photon:

$$E_T^\gamma > 150 \text{ GeV}, |\eta^\gamma| < 2.37$$

★ Offline $E_T^{\text{miss}} / \sqrt{\Sigma E_T} > 8.5 \text{ GeV}^{1/2}$; $\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > 0.4$

★ Accepting up to 1 jets: $p_T > 30 \text{ GeV}$ & $|\eta| < 4.5$

★ Lepton veto

★ CMS Signal selection

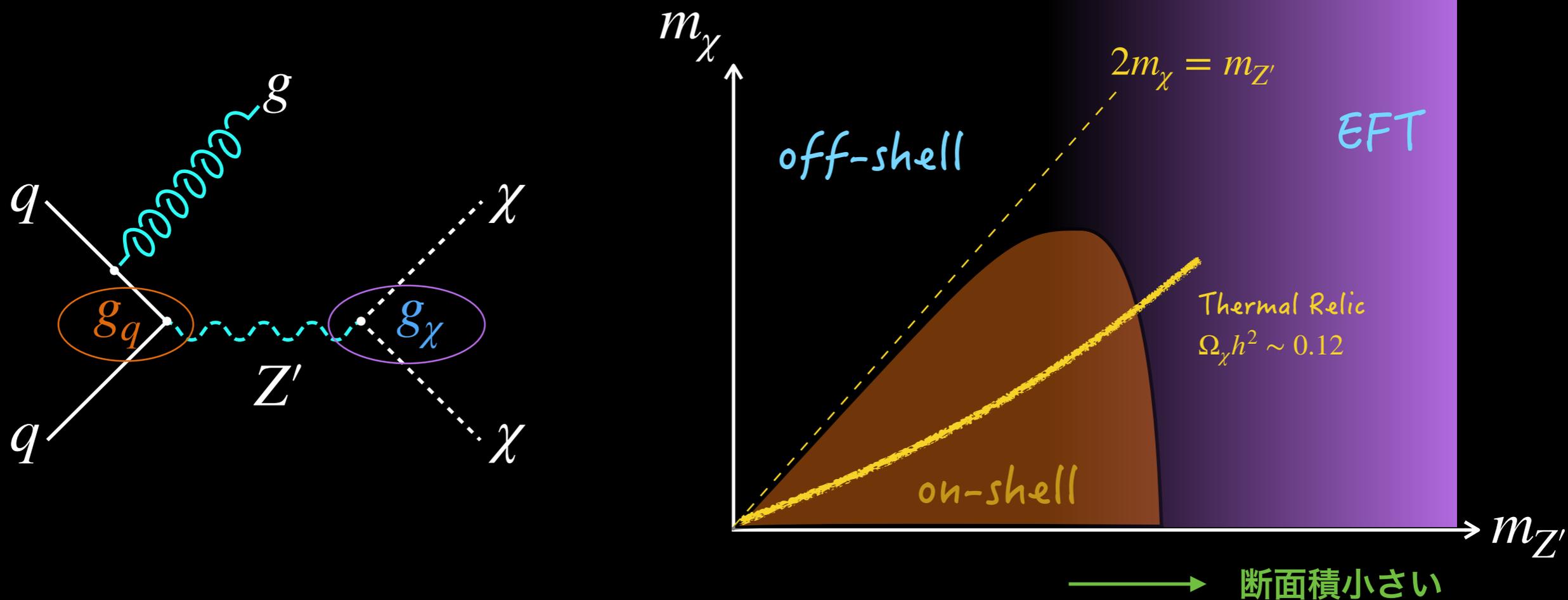
★ Photon trigger; Good-quality leading photon:

$$E_T^\gamma > 175 \text{ GeV}, |\eta^\gamma| < 1.44$$

★ Offline $E_T^{\text{miss}} > 170 \text{ GeV}$; $E_T^\gamma / E_T^{\text{miss}} < 1.4$; $\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > 0.4$

★ Veto min $\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, j) < 0.5$, $\Delta\phi(\vec{p}_T^{\text{miss}}, \gamma) > 0.5$

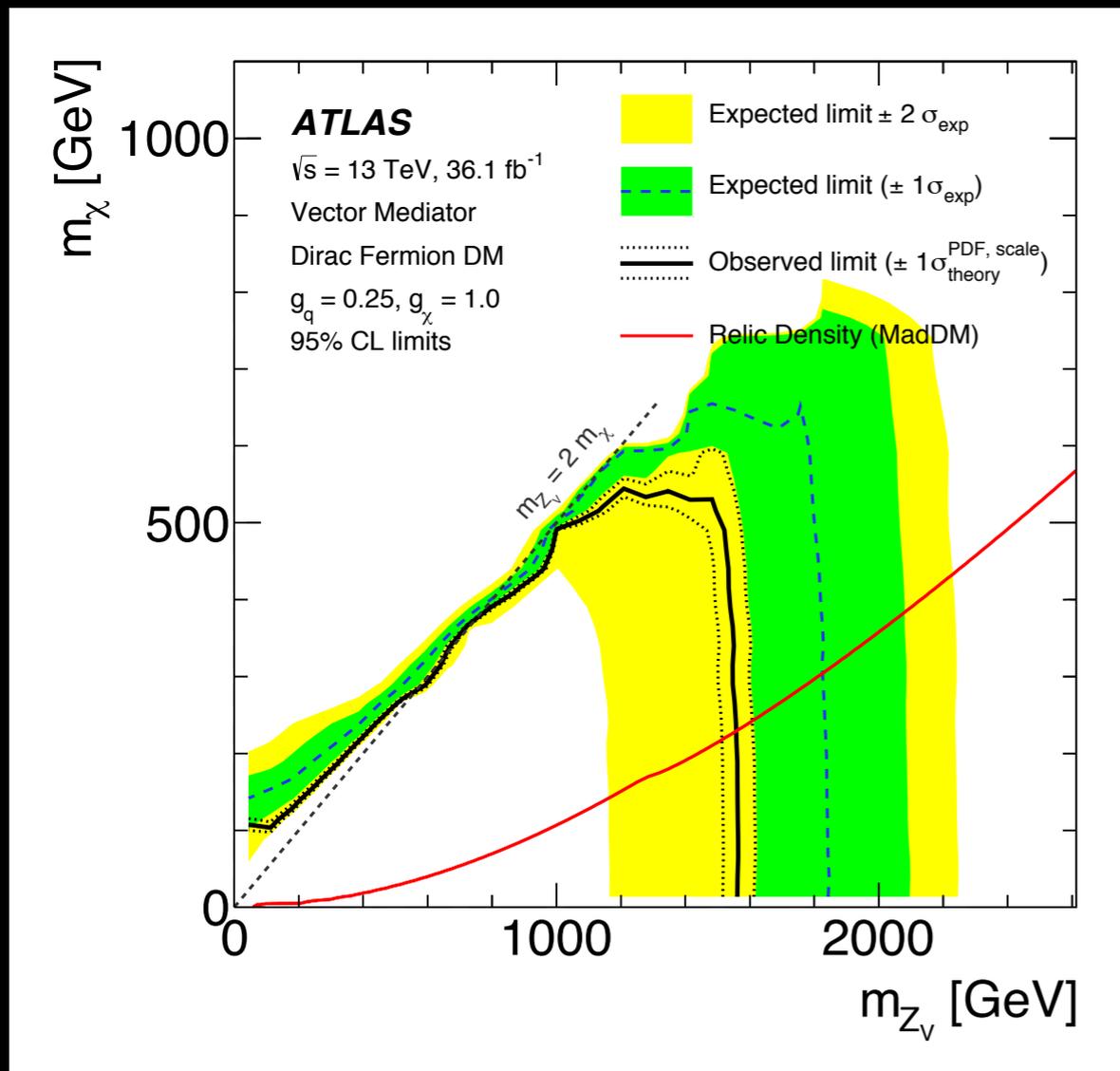
★ Lepton veto



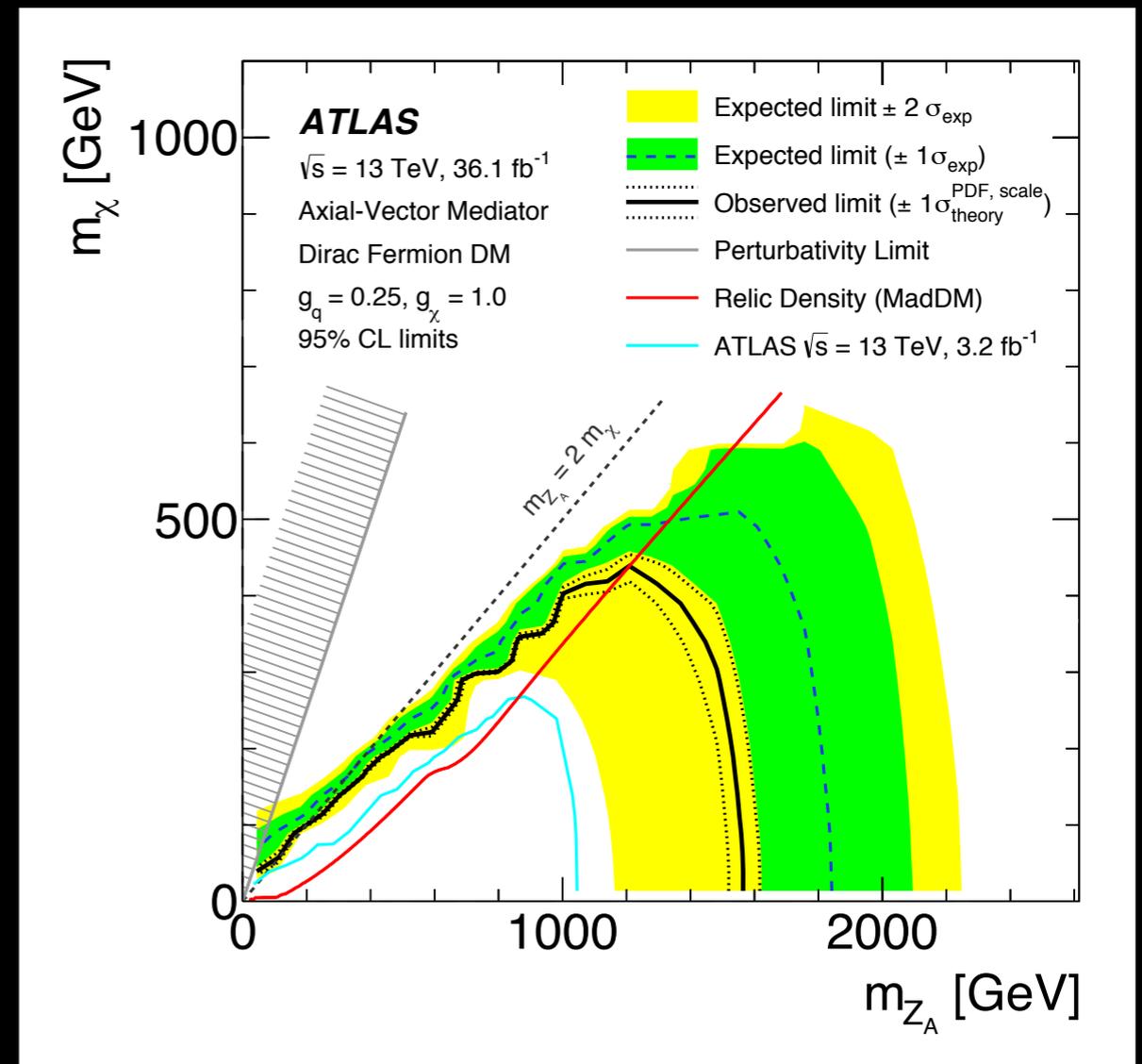
- ★ 通常 mediator width は比較的狭いと仮定： $\Gamma_{Z'}/m_{Z'} \lesssim 0.3$
- ★ 結合定数 (g_q, g_χ) を固定すれば，SUSY-likeなmass—mass でリミットが引ける。
- ★ EFTに焼き直したければ， $\Lambda \sim m_{Z'}/\sqrt{g_q g_\chi}$



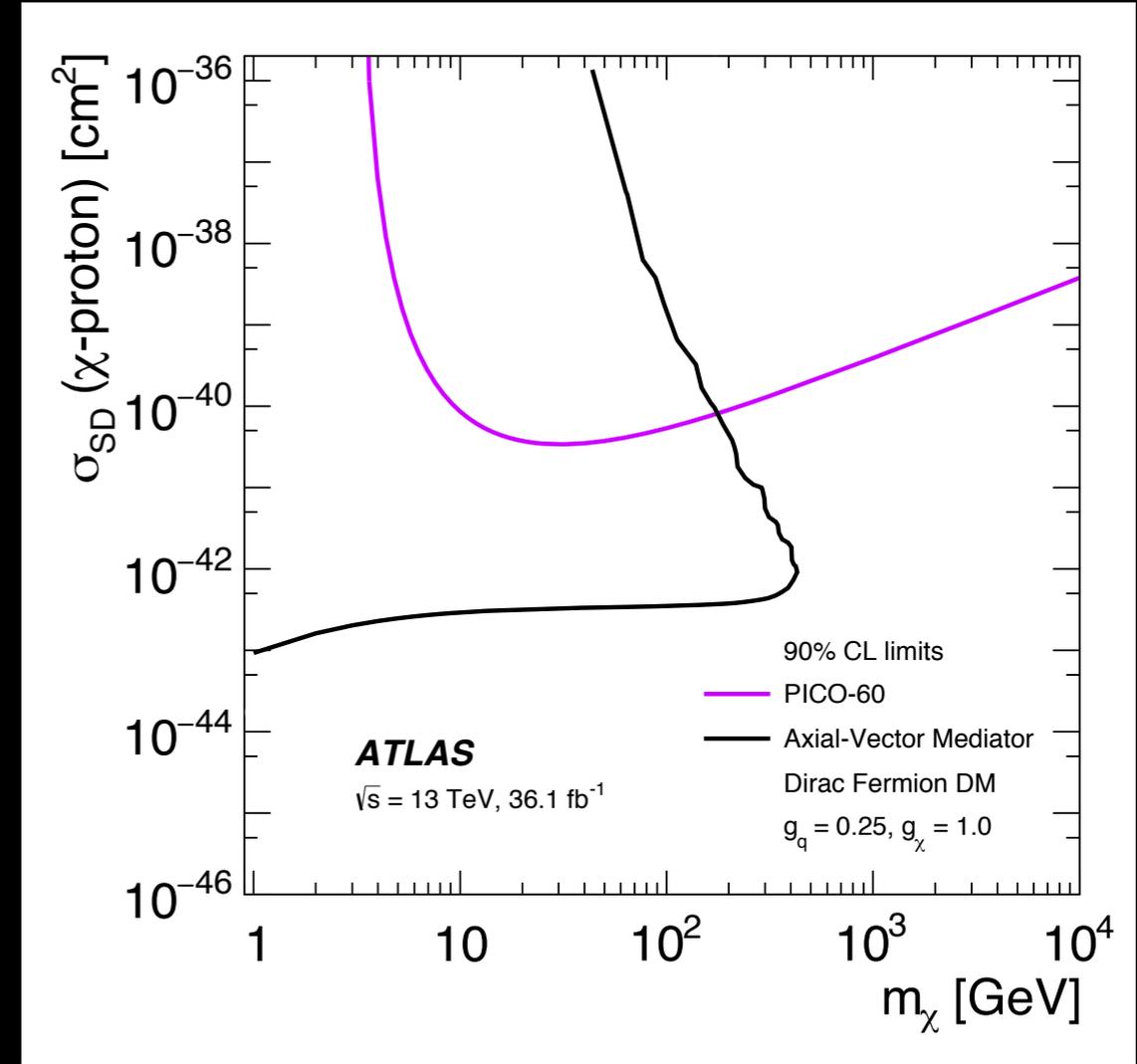
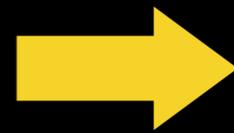
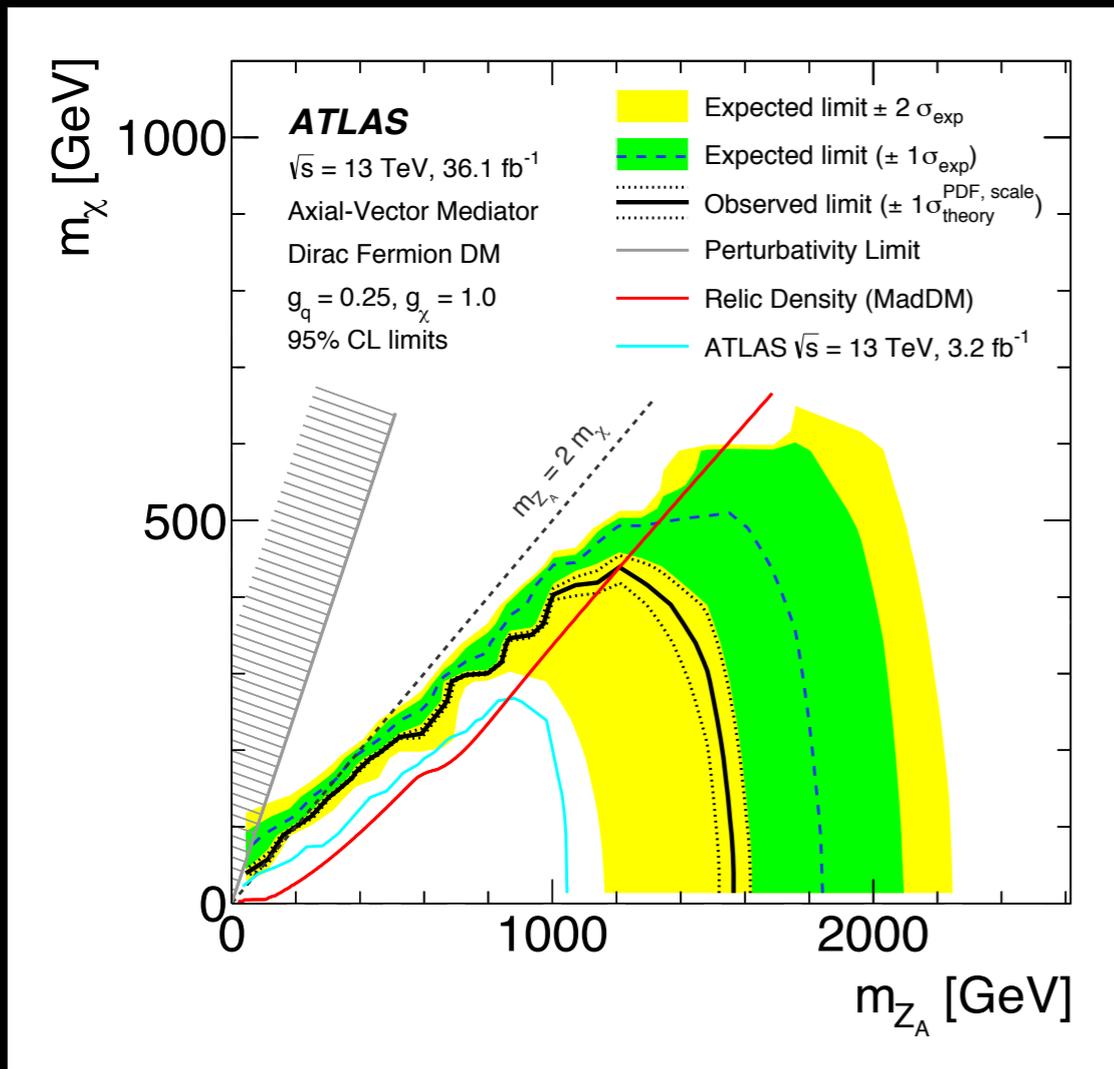
EXOT-2016-27



Vector mediator
Dirac Fermion DM
 $g_q = 0.25, g_\chi = 1.0$



Axial vector mediator
Dirac Fermion DM
 $g_q = 0.25, g_\chi = 1.0$



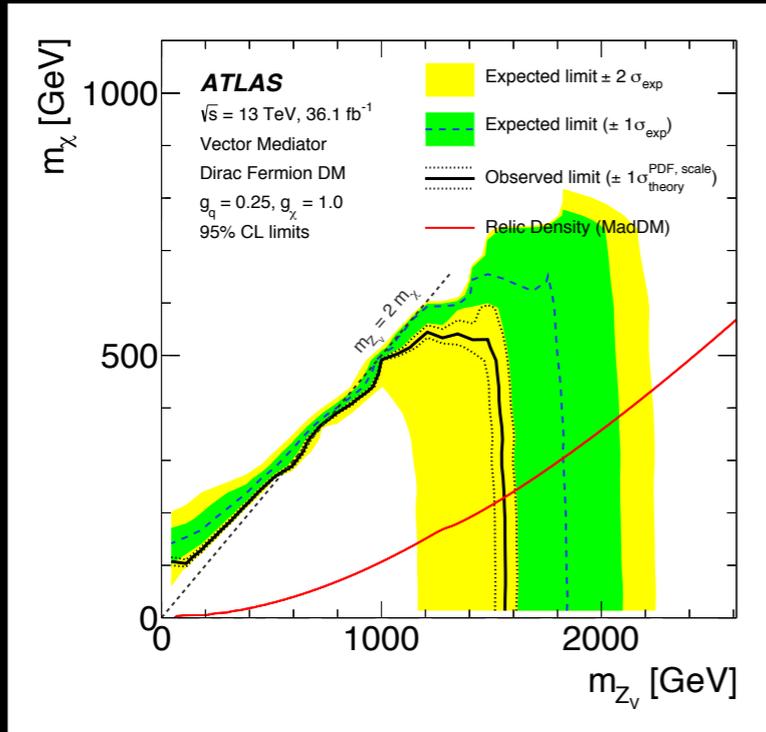
Axial vector mediator
Dirac Fermion DM
 $g_q = 0.25, g_\chi = 1.0$

注意：任意に選んだ特定の (g_q, g_χ) の
組み合わせのみで意味のあるリミット
左側95%CL, 右側90% CLに注意

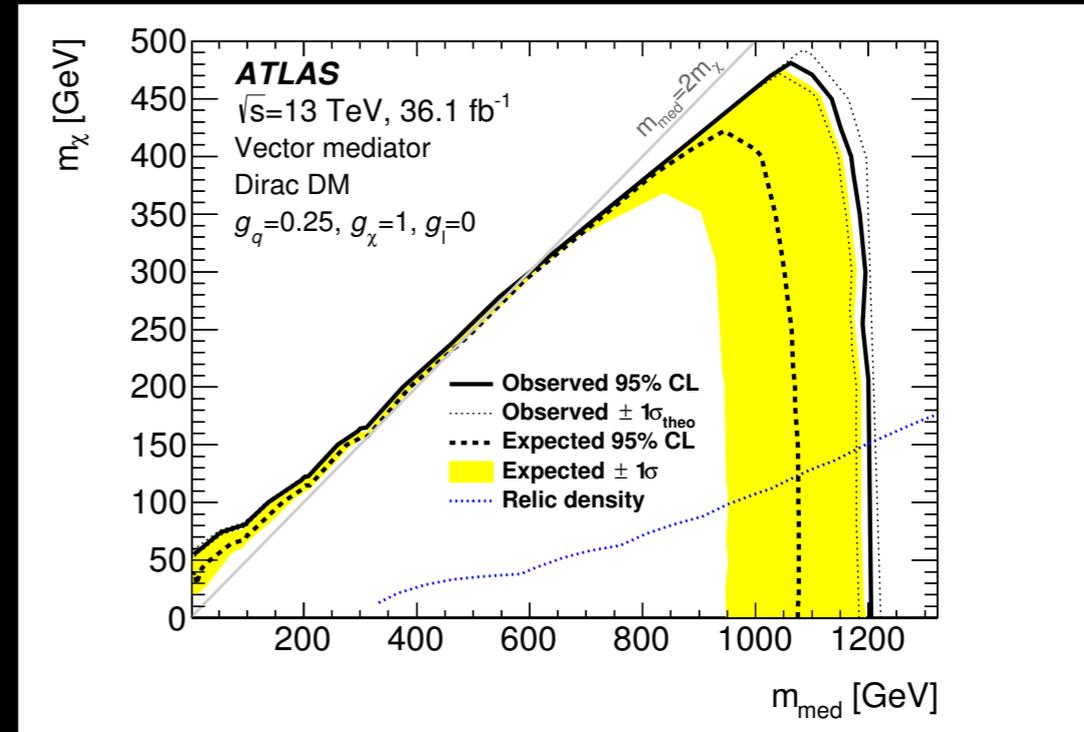
mono-X比較 (Vector, Dirac Fermion, $g_q = 0.25, g_\chi = 1.0$)



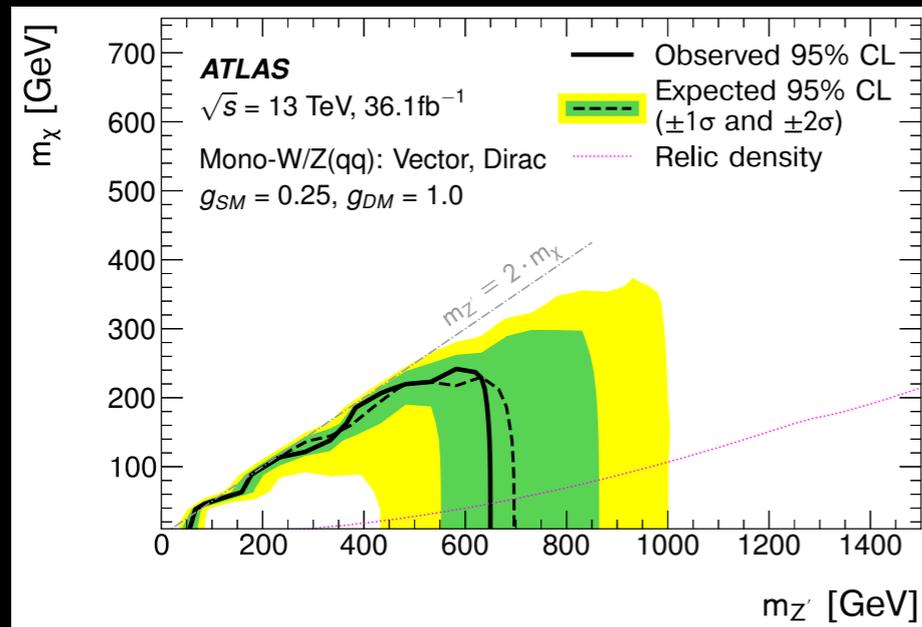
mono-j



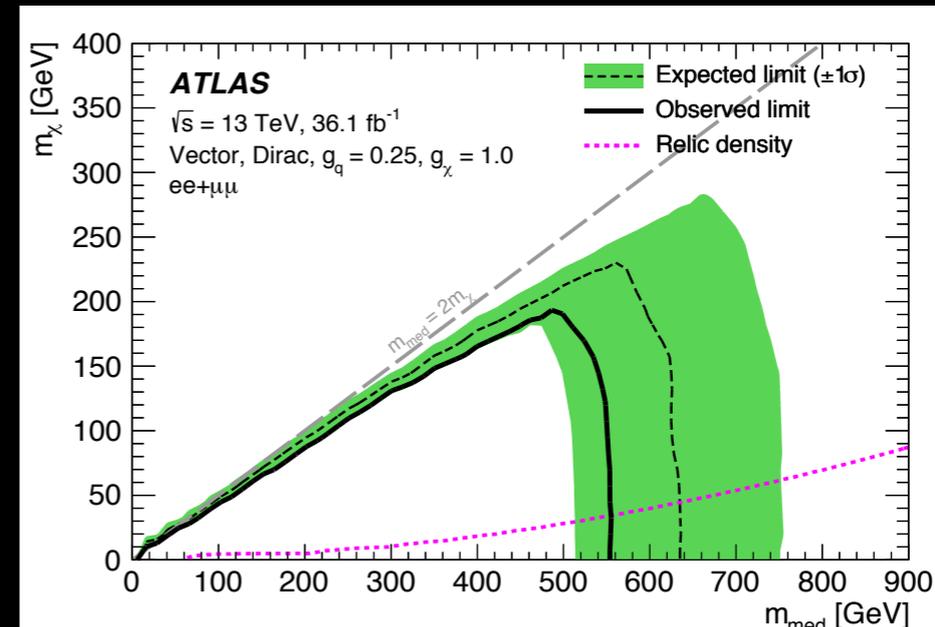
mono-gamma



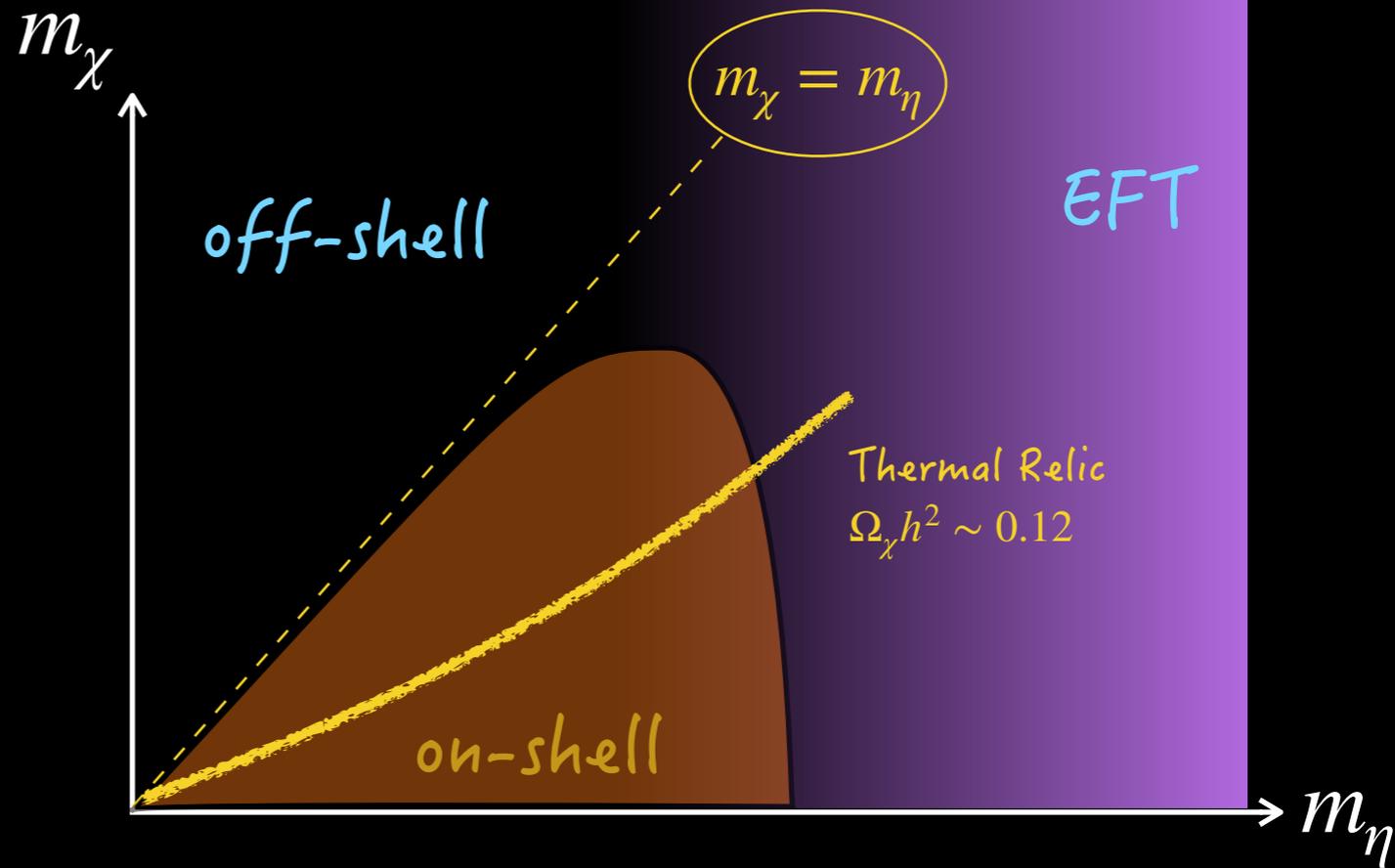
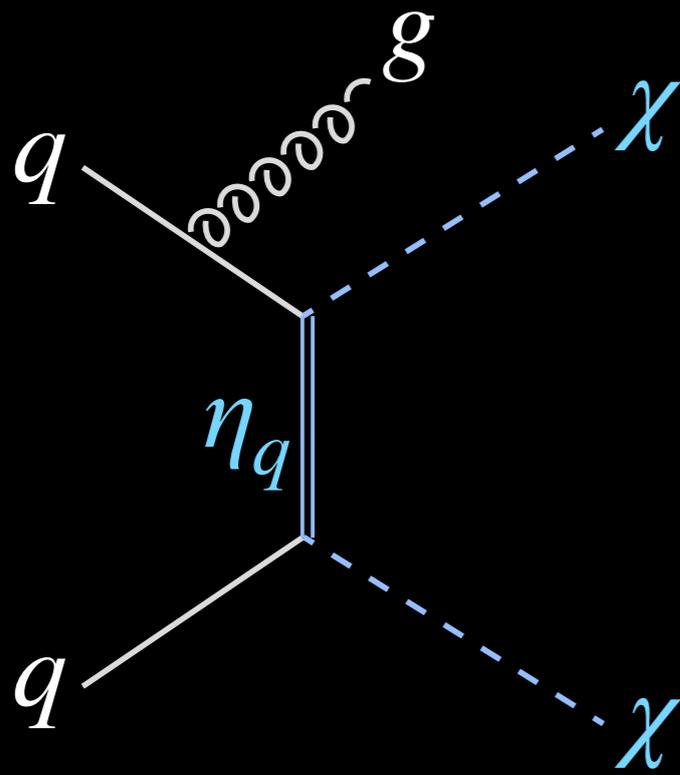
mono-V_had



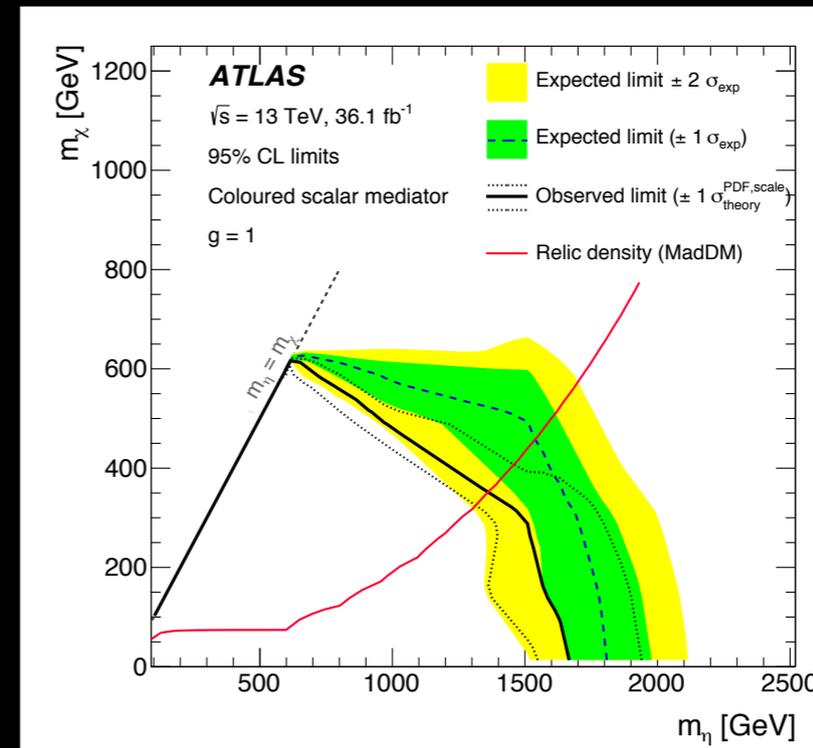
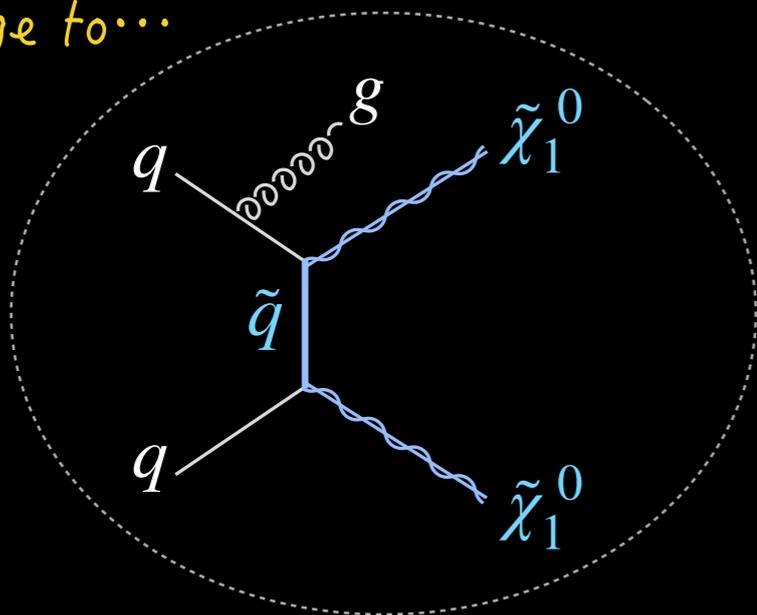
mono-Z(l l)



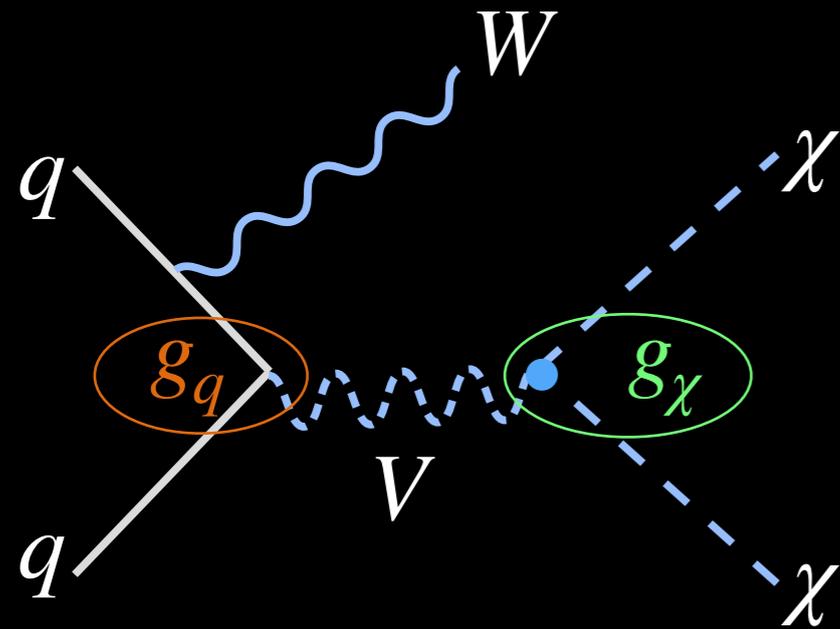
Variant #1: scalar colored mediator



in homage to...



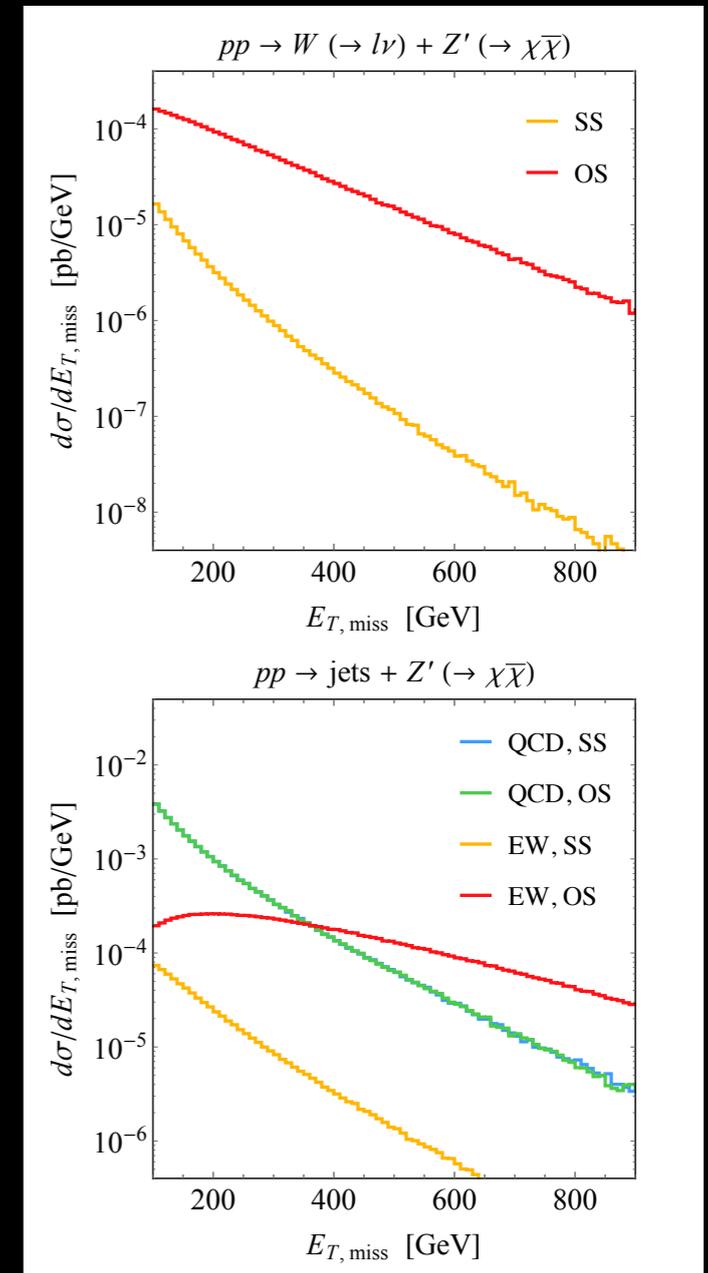
EXOT-2016-27



$$\mathcal{L}_V = \frac{1}{2} m_V^2 V_\mu V^\mu - m_\chi \bar{\chi} \chi - g_\chi V_\mu \bar{\chi} \gamma^\mu \chi - g_q^{ij} V_\mu \bar{q}_i \gamma^\mu q_j$$

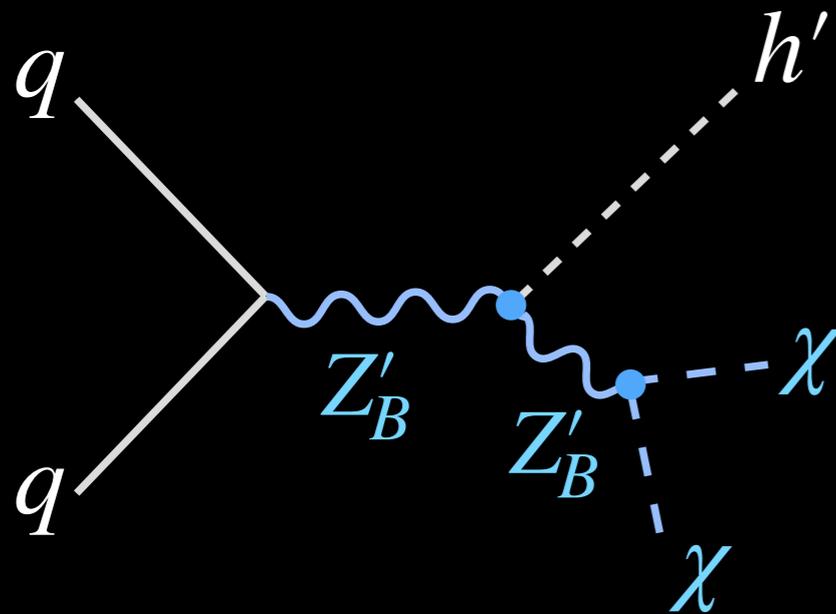
1603.01267

- ★ Vector mediator simpl. model のケース：もし V_μ の u_L と d_L への結合が異なれば，mono-W processは**ユニタリティ**を破る（Wの縦偏極成分の放出と関係）
→ $g_u^L = g_d^L$ を要請するか，あるいは別のユニタリティを回復する仕組みが必要。
- ★ Axial vector mediator の場合は mediator の縦成分は decouple しないので，heavy-flavor quarkとmediatorの結合が**非摂動的**になりえてしまう。
- ★ Mediator mass が**ゲージ対称性**を破っている → mediator のための baryonic なヒッグス機構 (dark Higgs) を別に用意してこないと UV-complete な理論として成り立たない。 → この文脈で VBC や type-II 2HDM が登場。

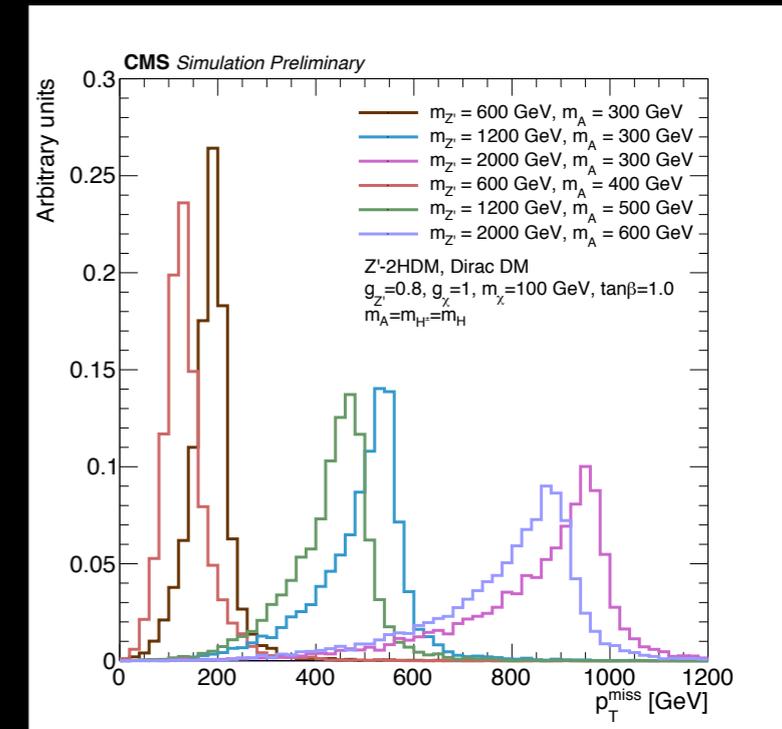
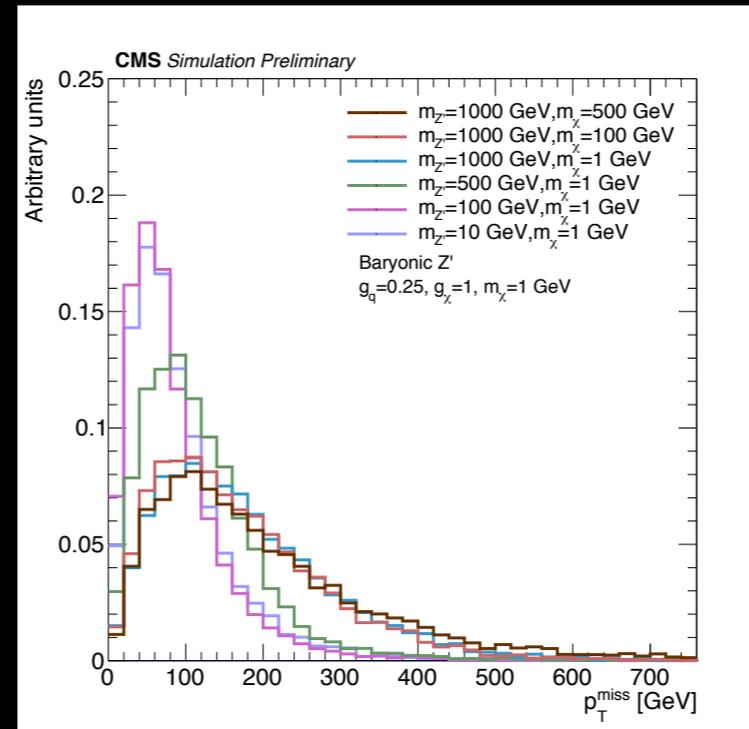




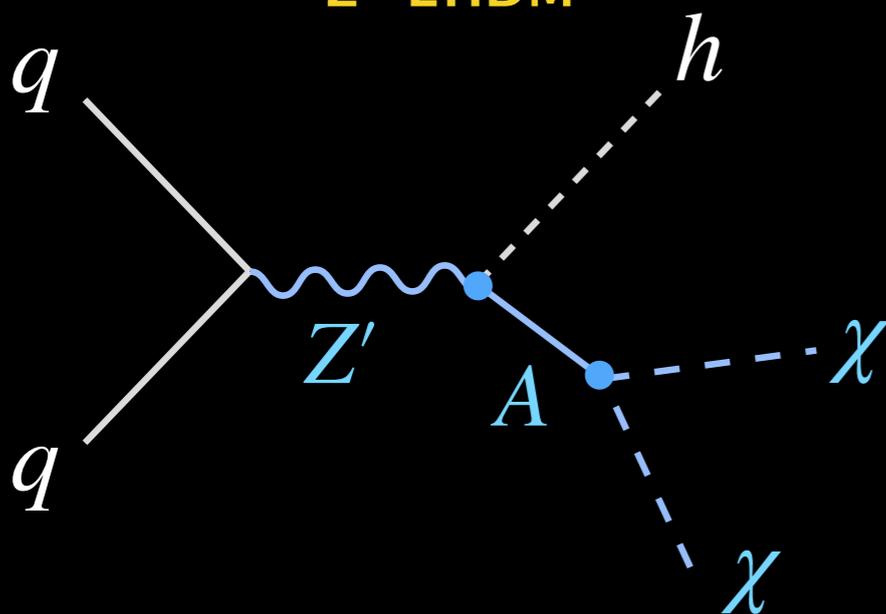
“non-resonant” Baryonic charged Z'



CMS-EXO-18-011



“resonant” Z' -2HDM

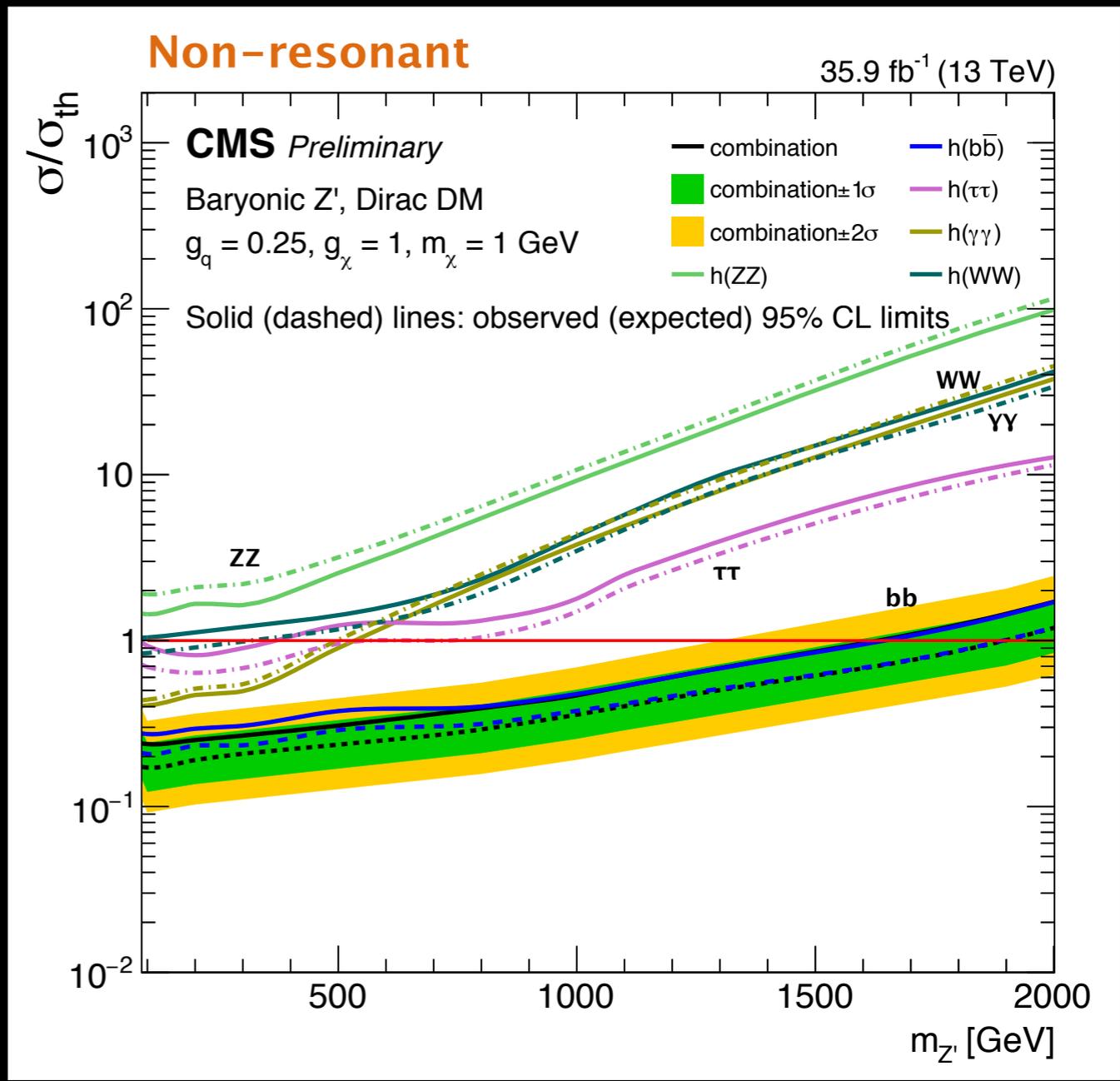
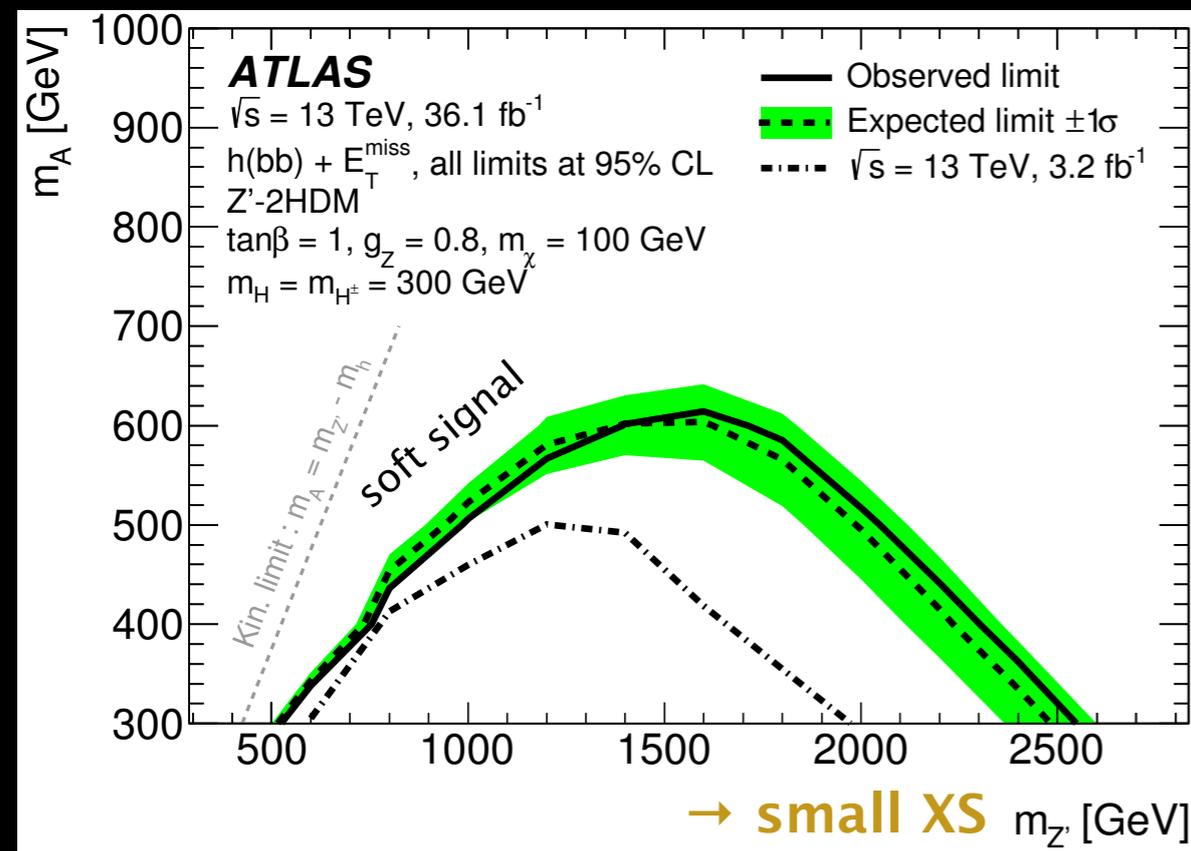
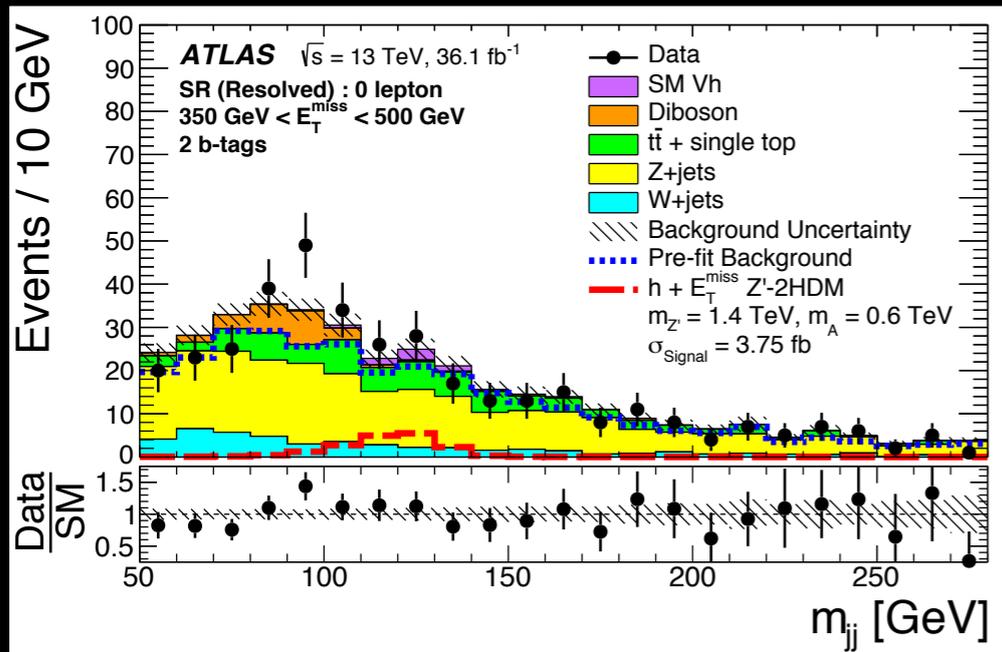


- ★ VBC: Simpl. modelで導入される Z' の質量について責任をもつ baryonic higgs h_B が $U(1)_B$ を自発的に破り、かつSM higgsと混ざる.
- ★ 似たような構造は $U(1)_{Z'}$ について拡張した type-II 2HDM にも埋め込むことができる(Z' -2HDM).
- ★ VBCとの違いはresonantかどうか.
- ★ SM higgsとmixingを起こす可能性がある→ **mono-h** signature
- ★ 言うまでもなくISRではHiggs emissionは期待できない.



ATLAS-EXOT-2016-25

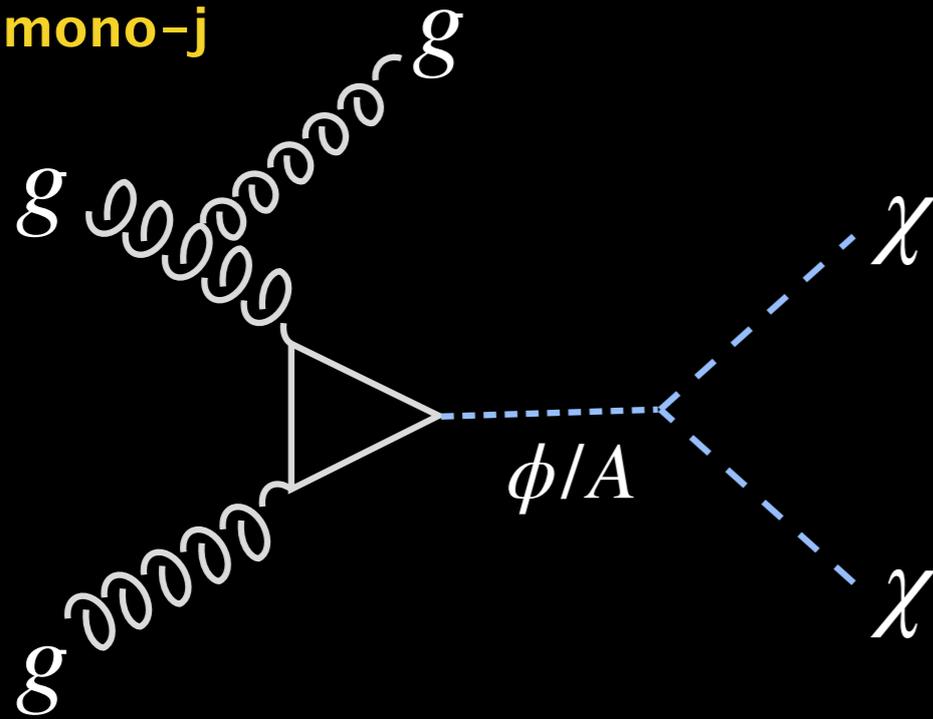
CMS-EXO-18-011



- ★ ATLAS: mono-h(bb)のみ
- ★ CMS: 様々なh-decayを見ている.
Resonant/non-resonantにそれぞれ制限.



ggF mono-j



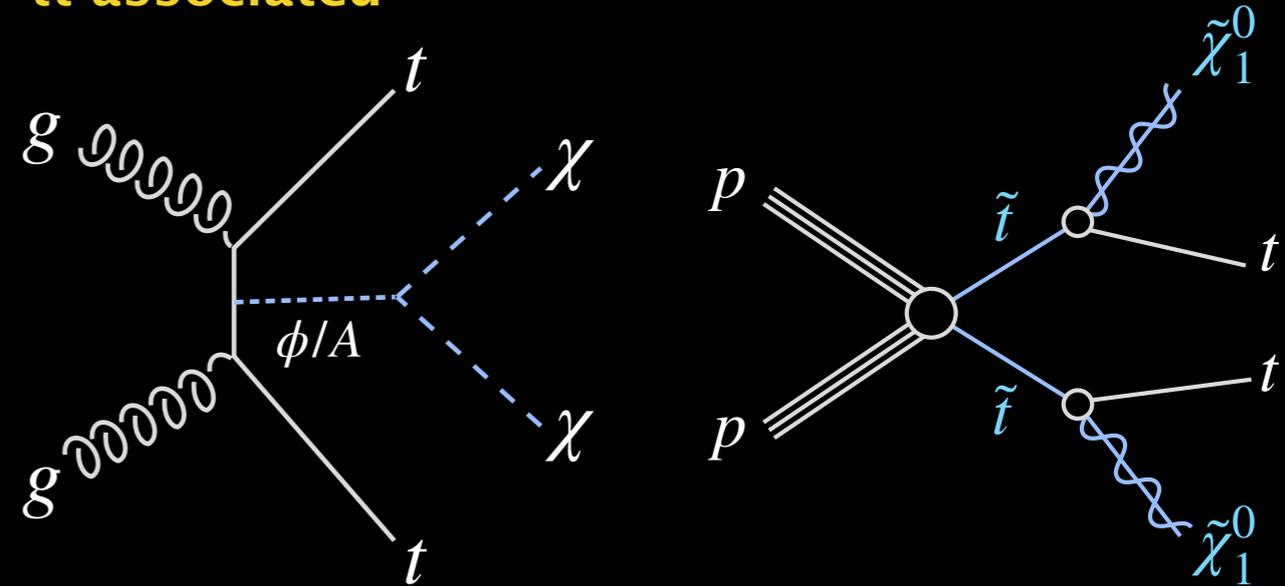
(湯川結合)

Scalarなら: EFTの $\frac{m_q}{4\Lambda^3} (\bar{\chi}\chi) (\bar{q}q)$ に対応

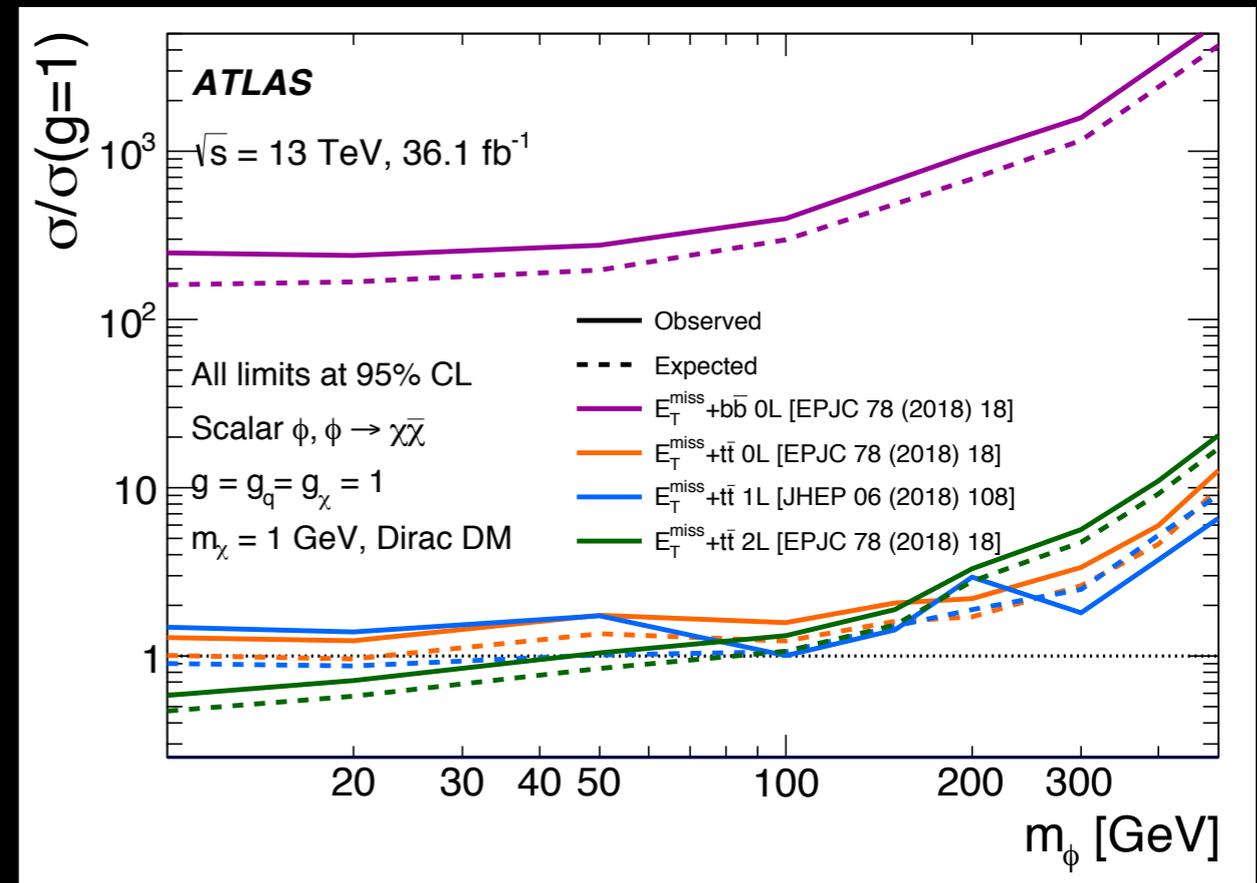
★ mono-jet のみならず tt/bb+MET も探索の signature として有効.

★ Final stateだけ見ると stop/sbottom searchと同じsignatureになる.

tt associated



EXOT-2017-32



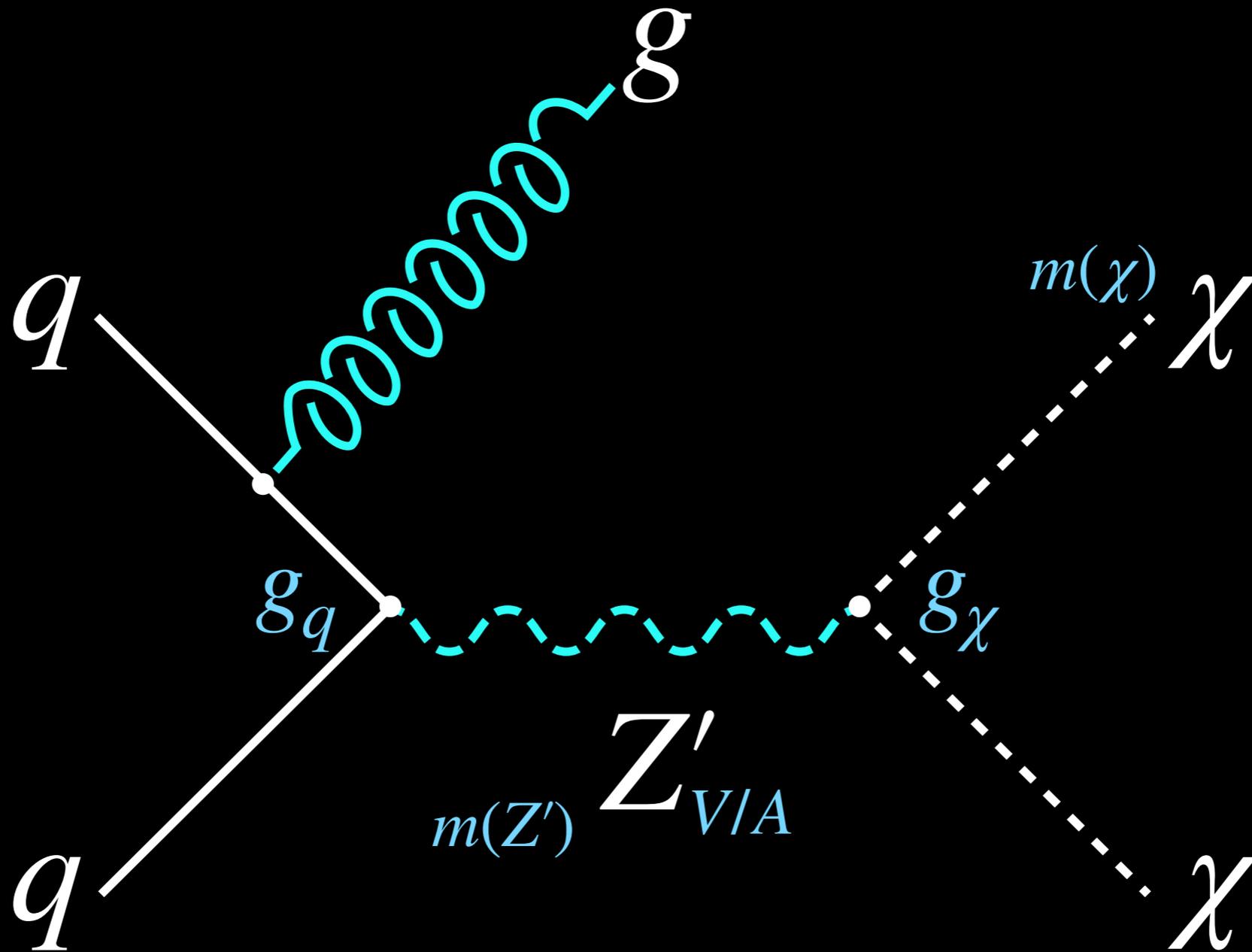


Mediator

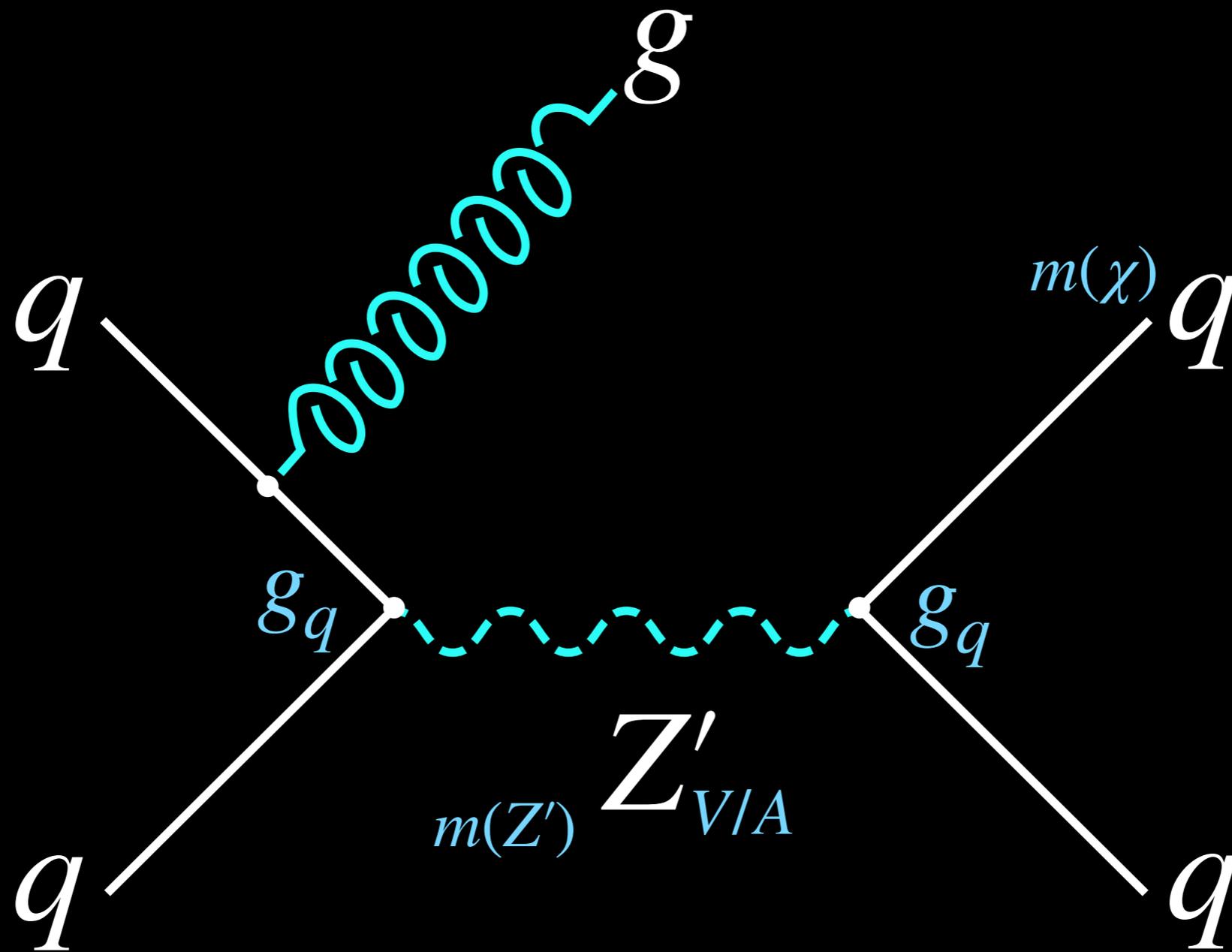


- ★ もともと「DMが作れさえすれば良い」という発想からスタートして**EFT**をやっていた.
- ★ EFTでは**使い勝手**が悪いので, **mediator**を導入することで困難を回避しようとした.
 - ★ 実験的にはやること (**mono-X**) は大して変わらない...と思われた.
- ★ しかし, 便宜のために導入したはずの simpl.model における mediator の「意味」をもっと「真剣に」考える人たちが現れた.
 - ★ 「DM探索と言っても, 結局**DM-SM相互作用を見つけられるかどうか**だよね」

これがありえるなら...

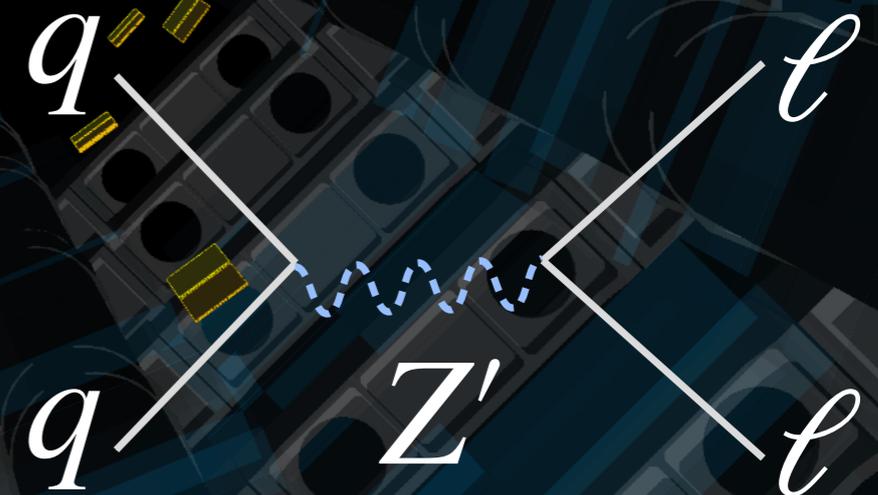
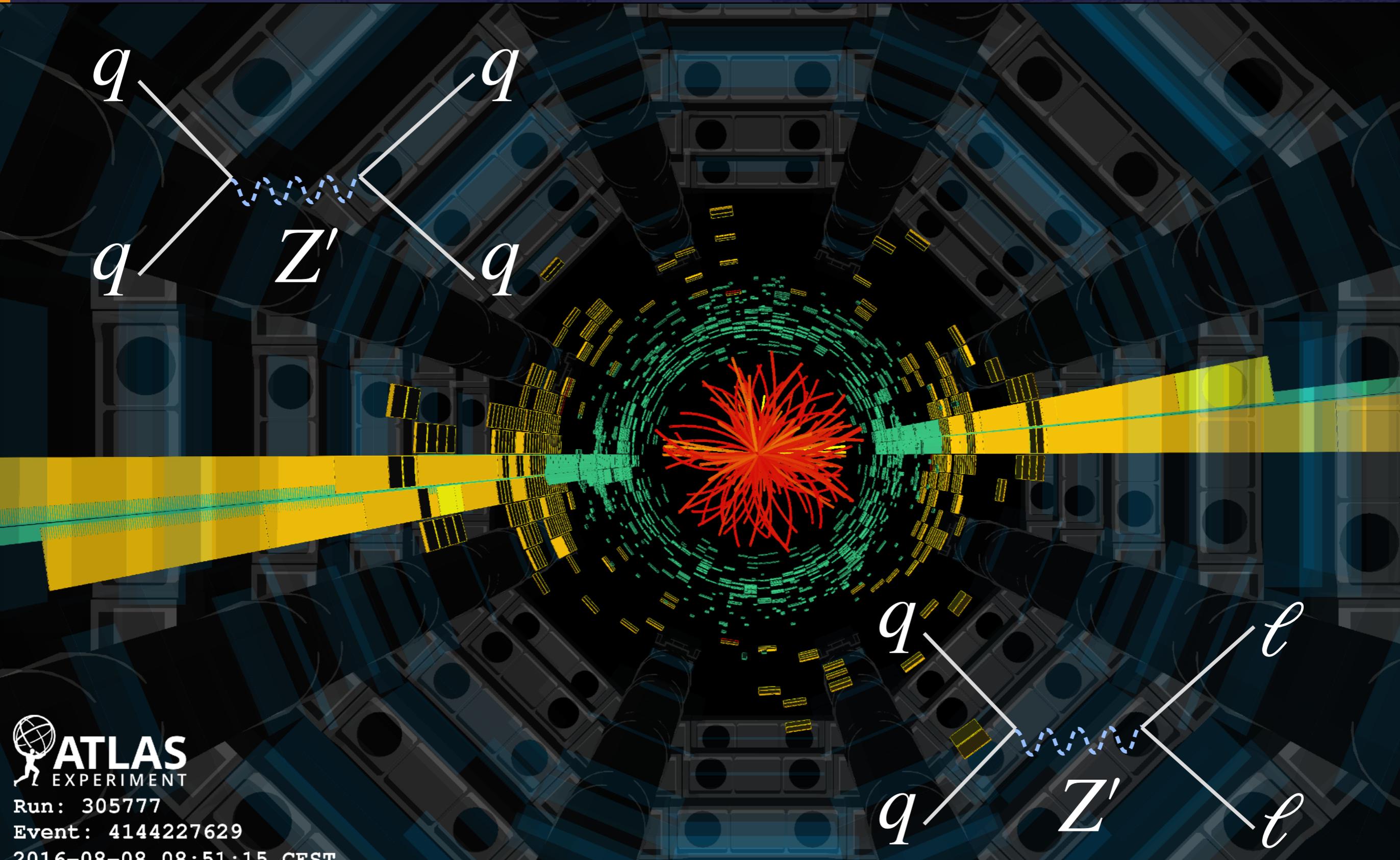
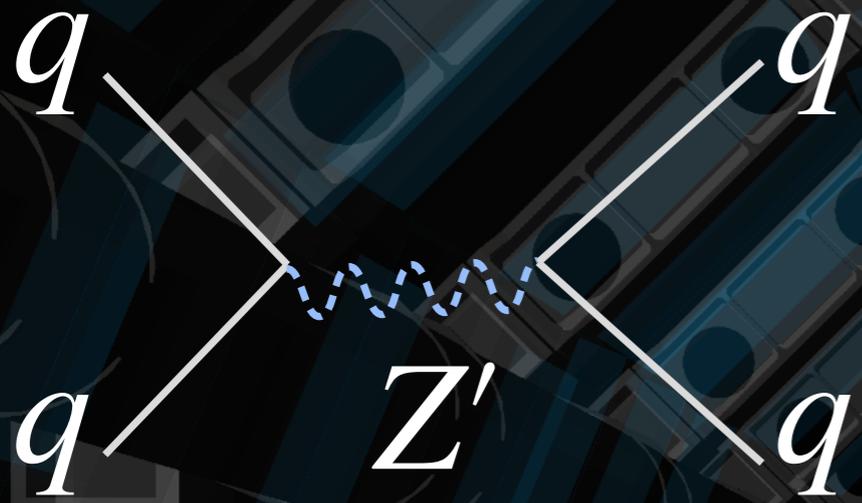


...これもあって良いでしょう, ということになる



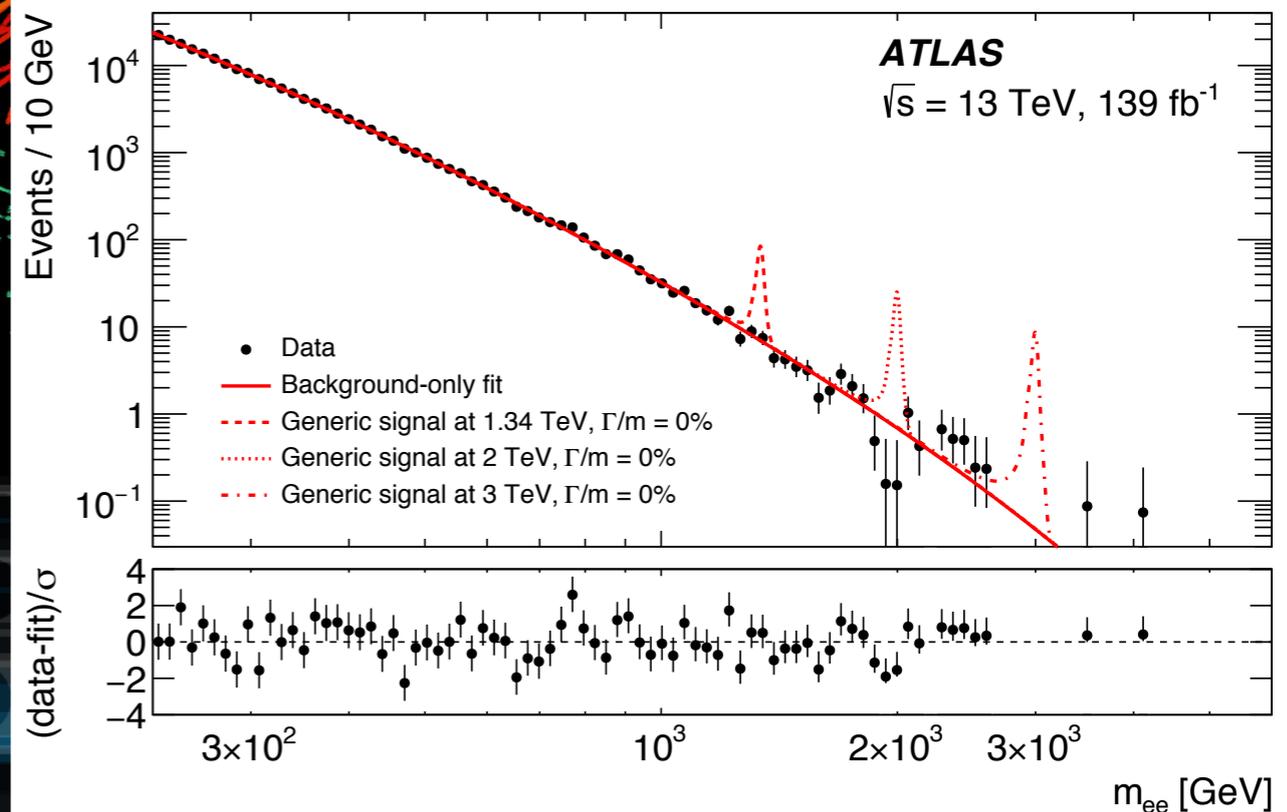
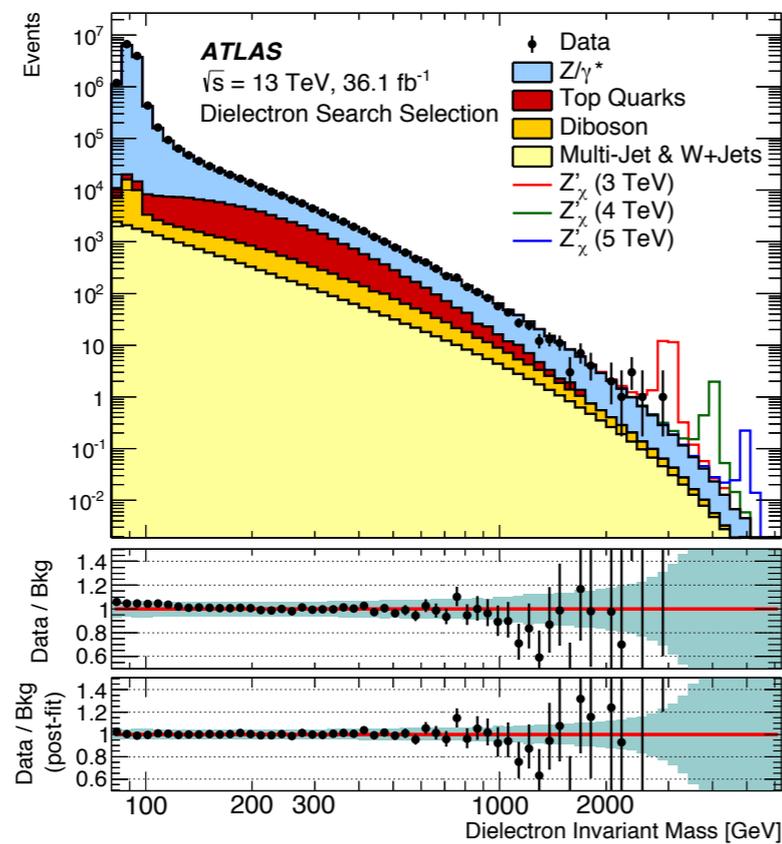
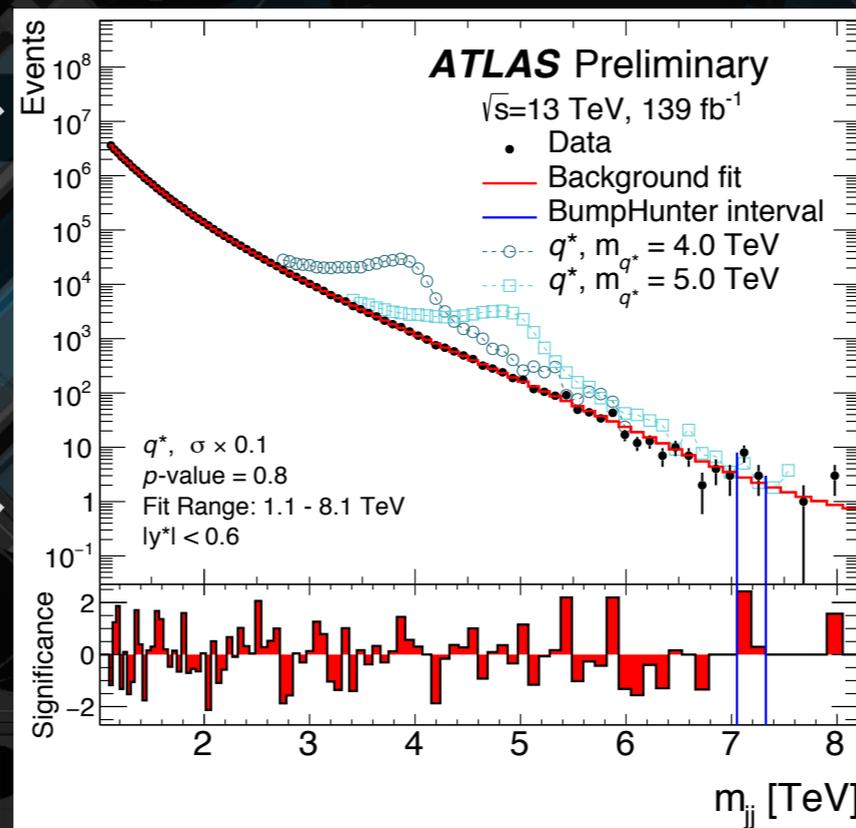
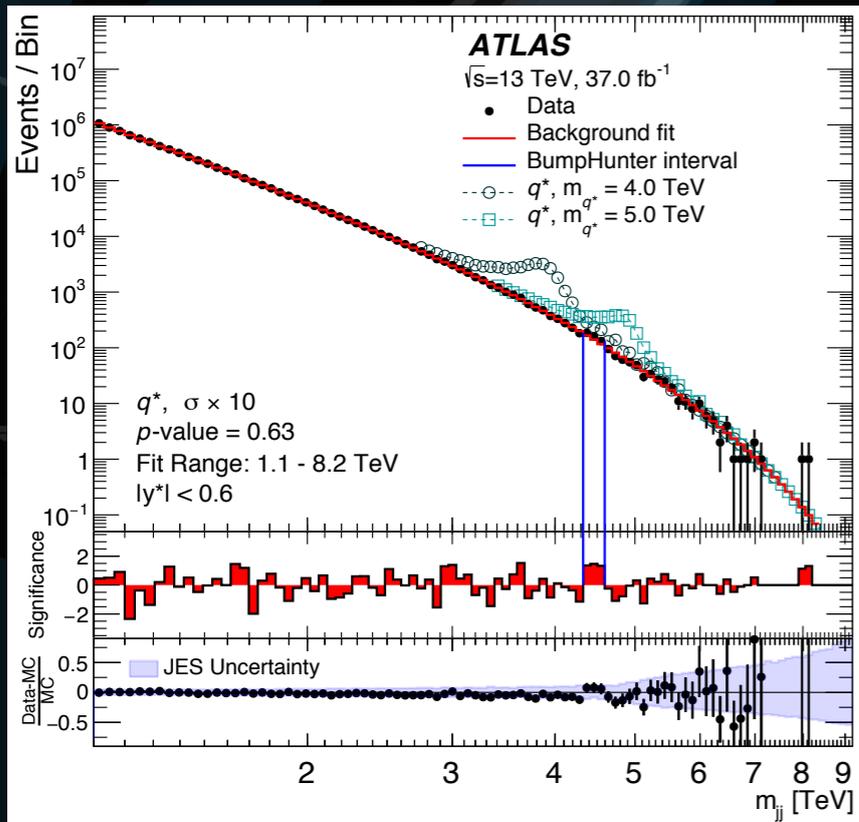
★ DM探索から出発したけど, もうここにはDMは直接登場しない

Resonance strikes back



Run: 305777
Event: 4144227629
2016-08-08 08:51:15 CEST

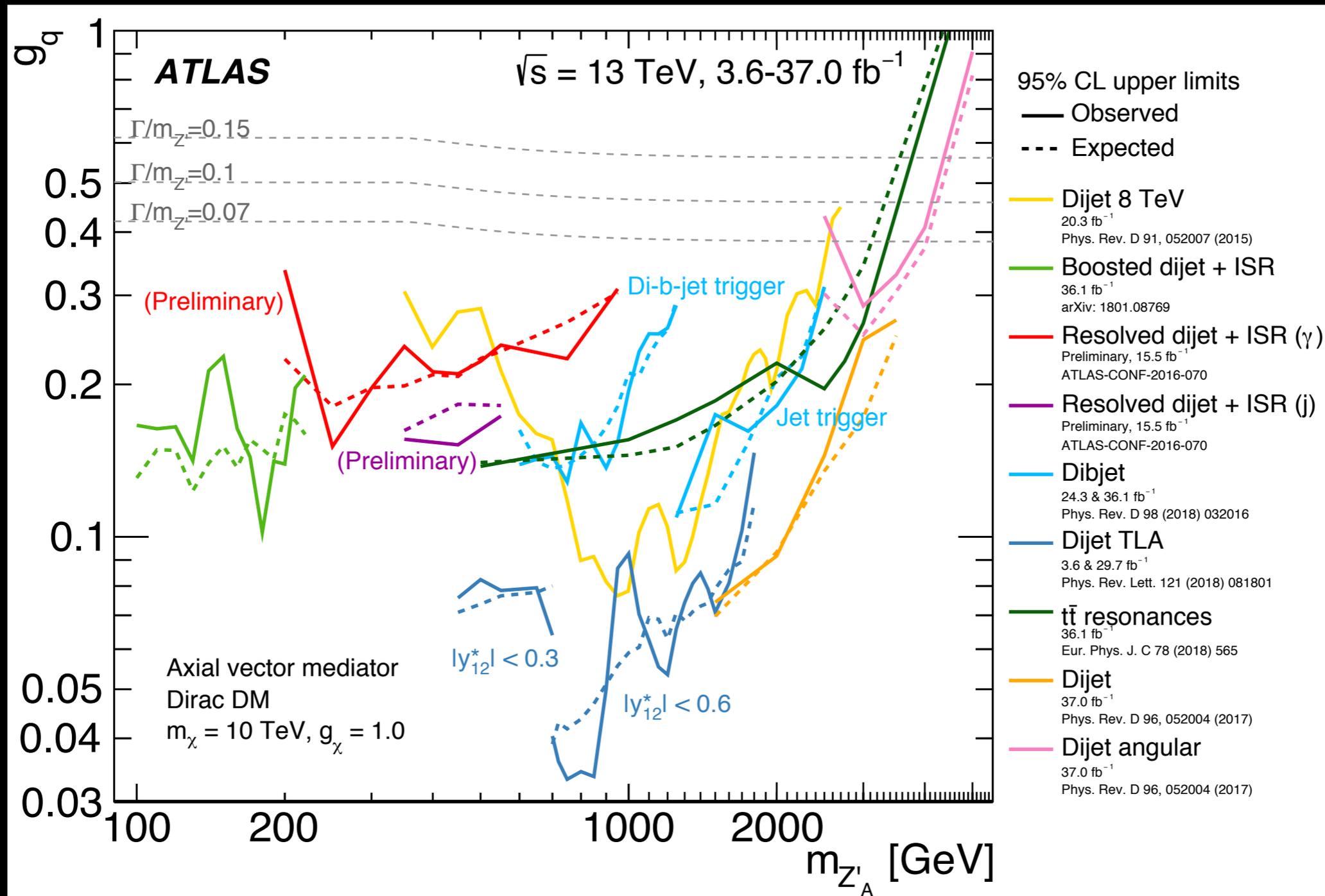
Resonance strikes back



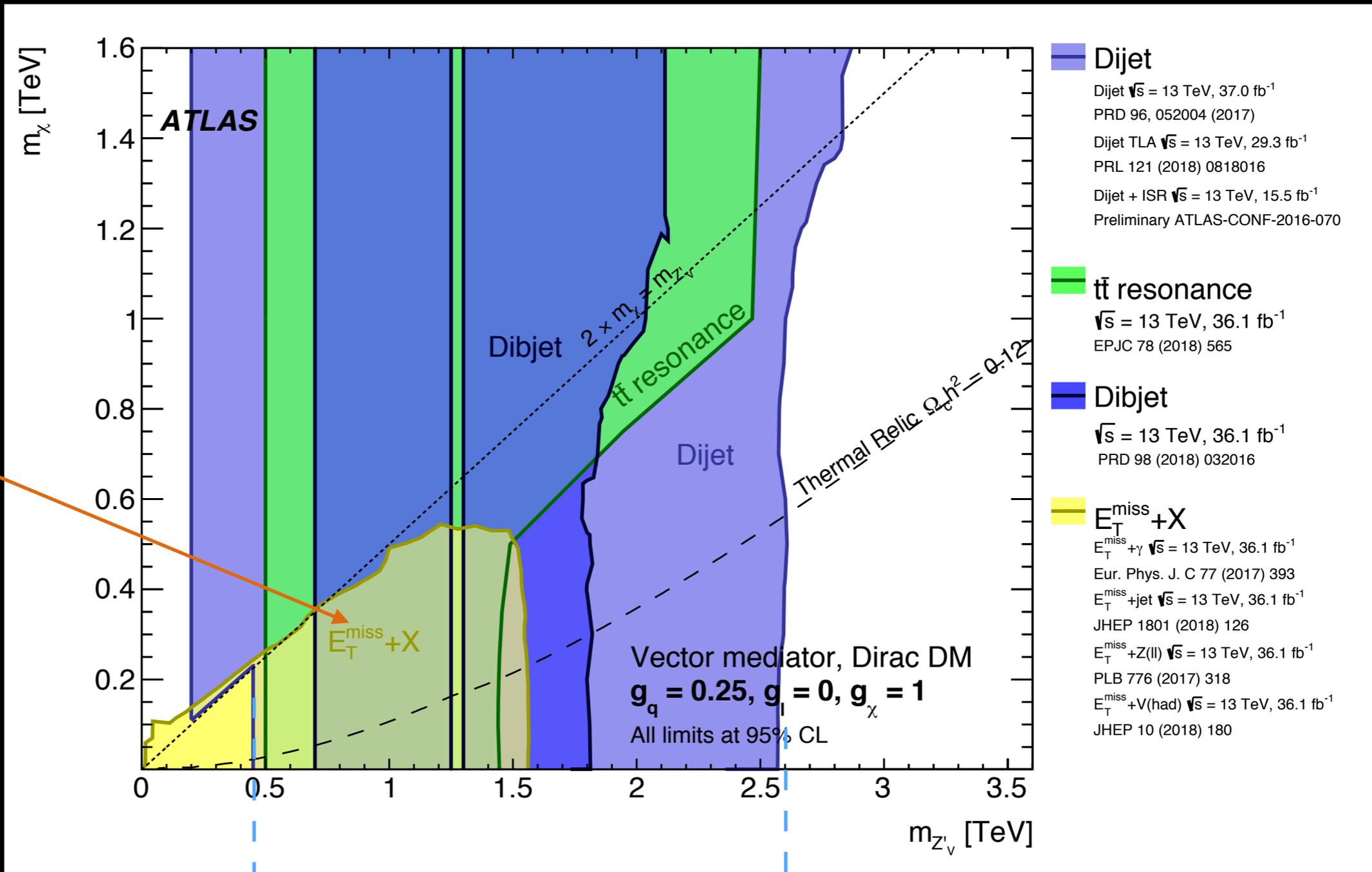
ATLAS
 EXPERIMENT
 Run: 305777
 Event: 4144227629
 2016-08-08 08:51:1



EXOT-2017-32



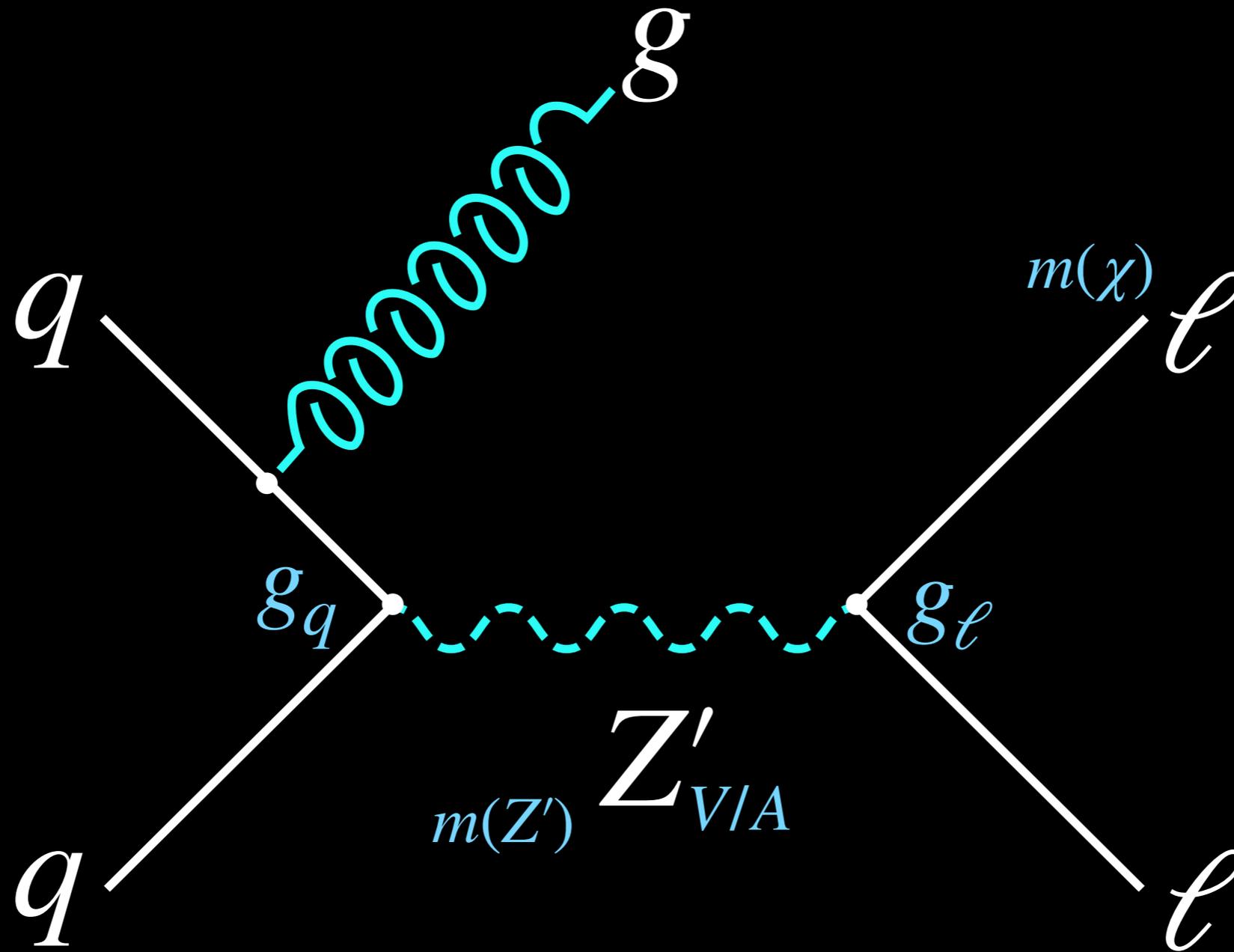
★ TLA: much higher event throughput than than the standard HLT at the cost of discarding the detail of the event information.



もともとの
mono-Xでの
DM探索

dijet resonance

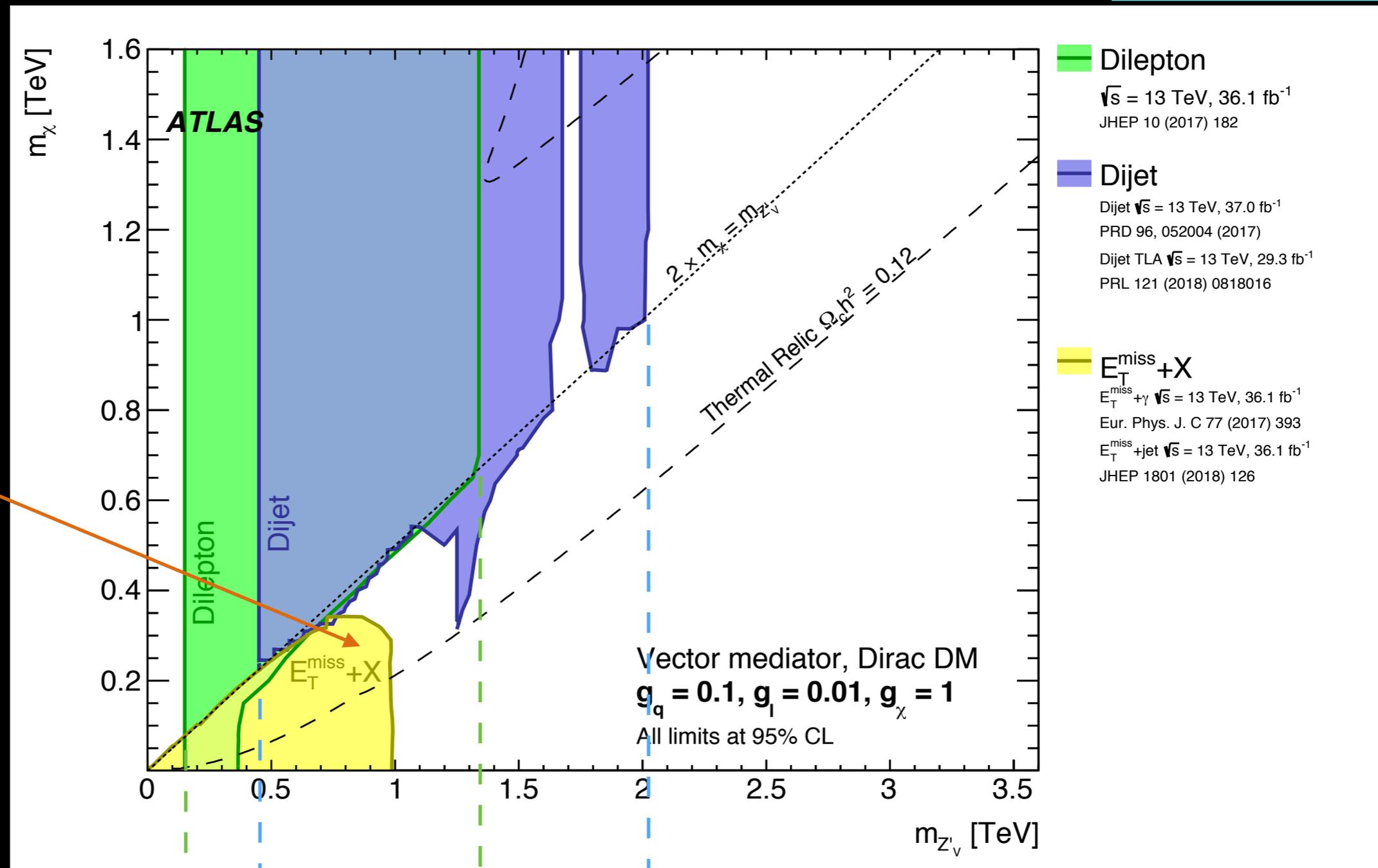
Vector, Leptophobicのケース ($g_q = 0.25, g_\chi = 1.0$)



★ アノマリーを回避しようと思うと l との結合も motivate されてくる.



もともとの mono-Xでの DM探索



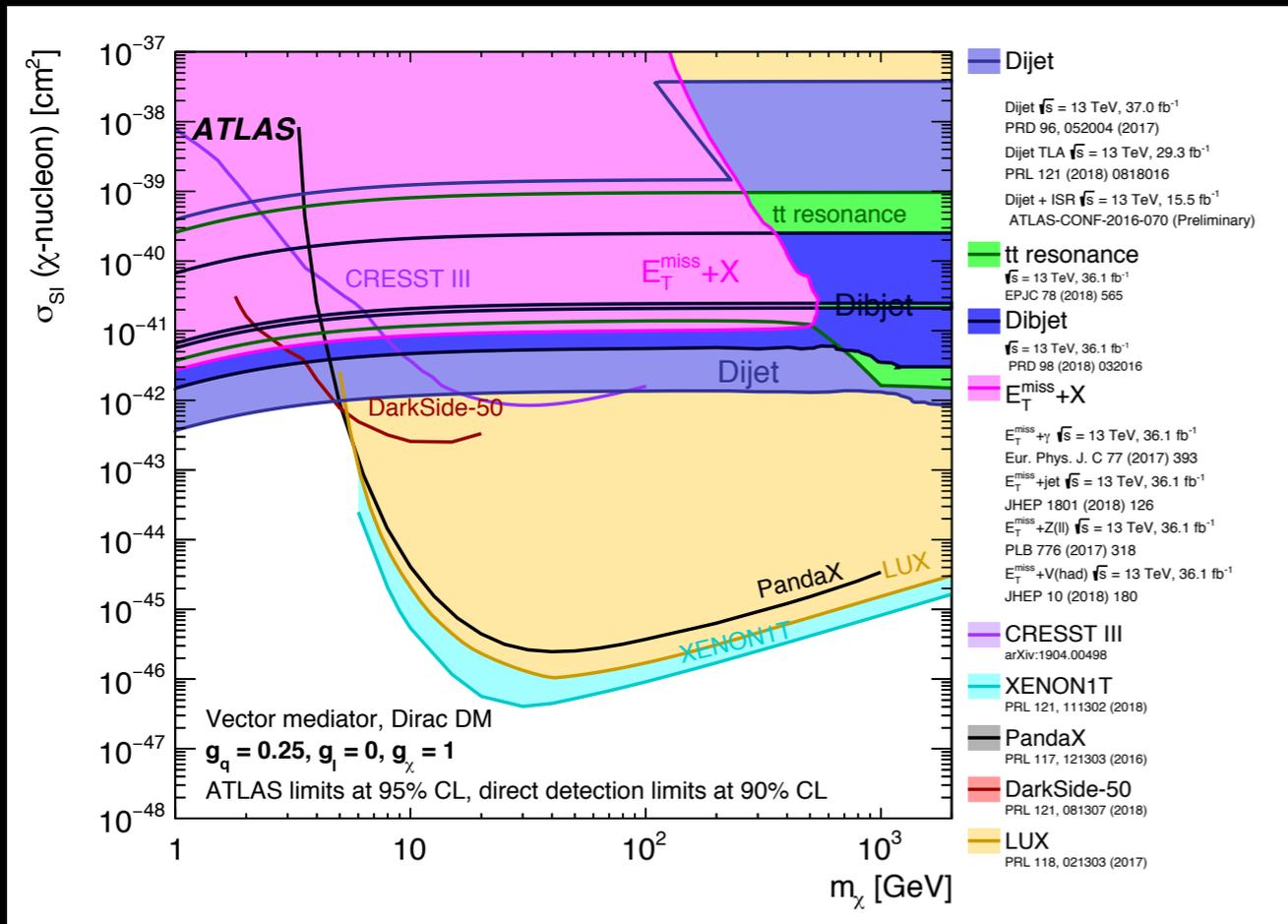
dijet resonance

dilepton resonance

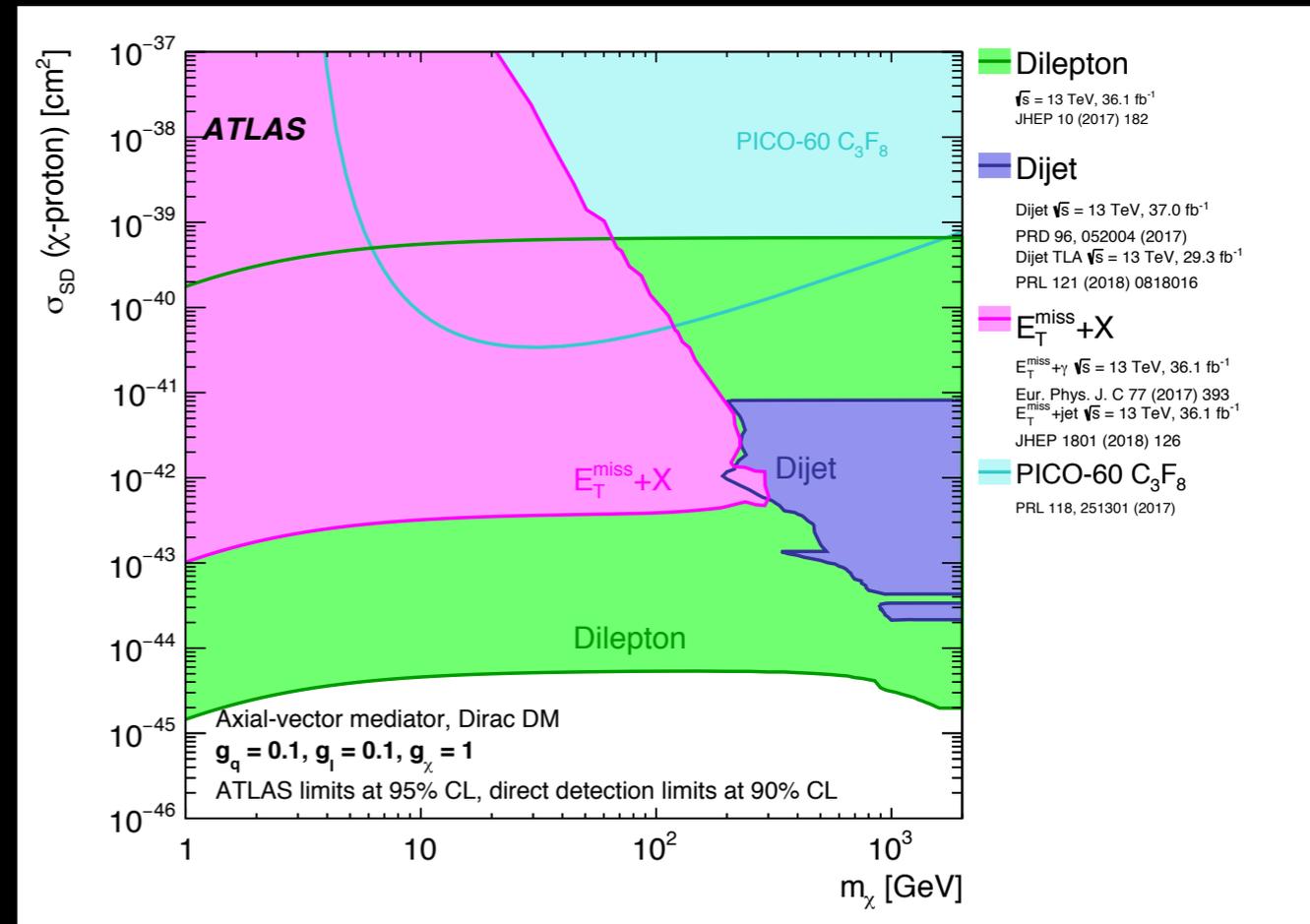
Vector, Leptophilicのケース
($g_q = 0.1, g_l = 0.01, g_\chi = 1.0$)



Spin Independent (SI)



Spin Dndependent (SD)



★ LHCの感度はSI/SDで「さほど」変わらない.

★ 特にDDと比較するとSDでは顕著に強みがある.

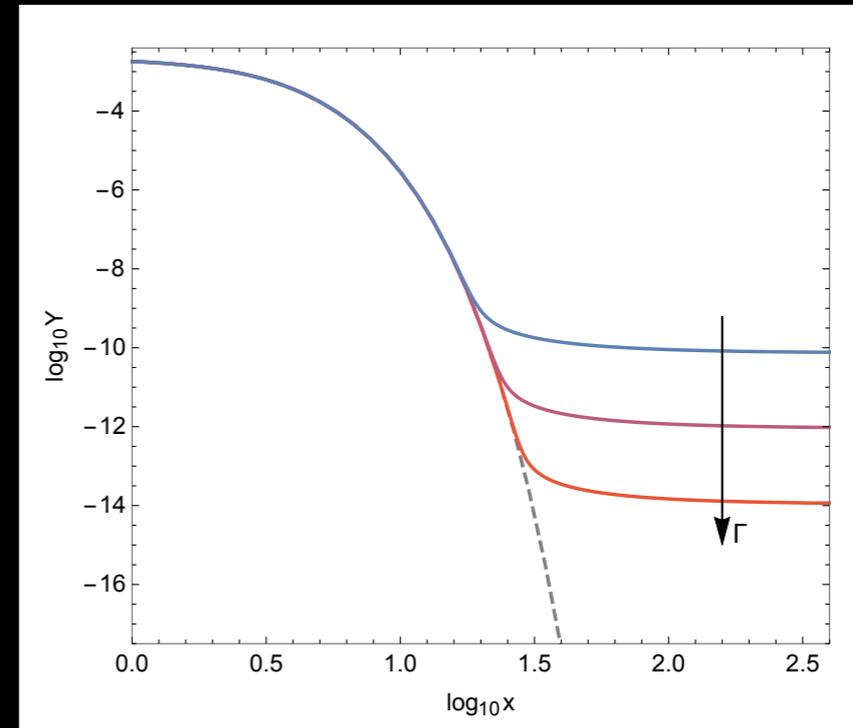
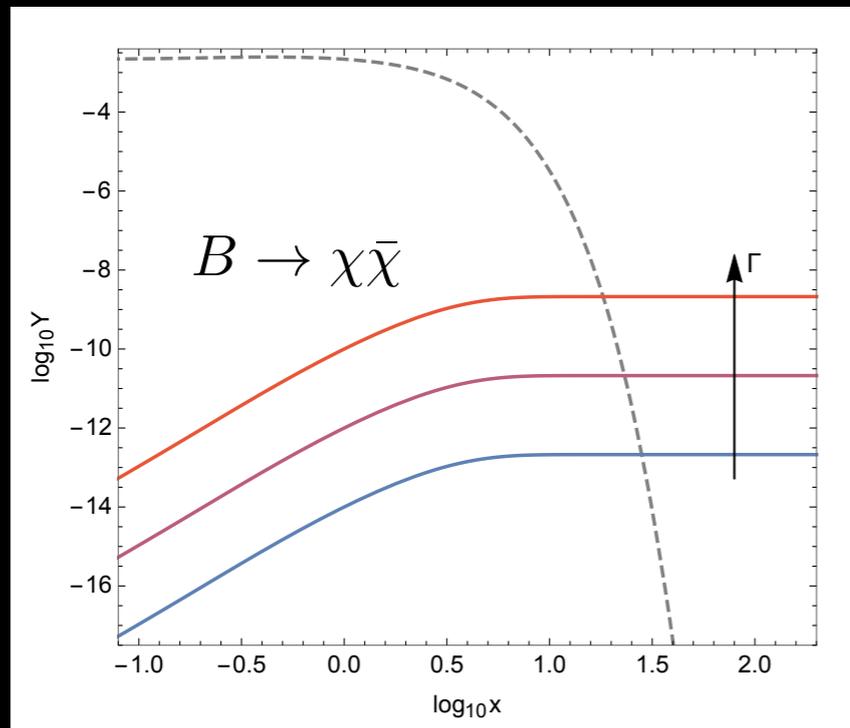
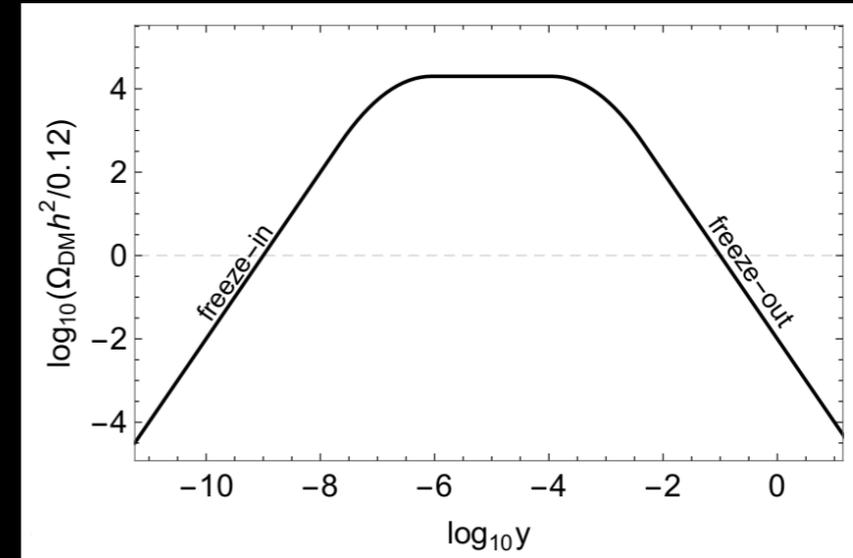
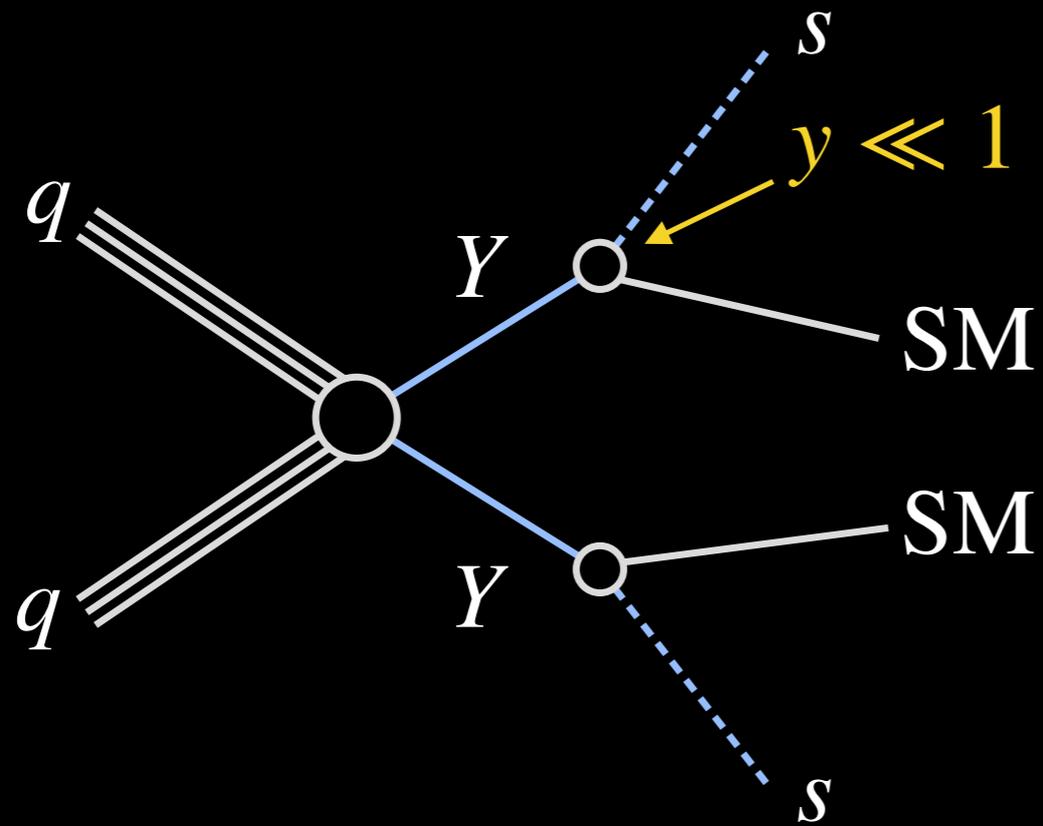
★ DDの結果がmodel-independentなのに対して, LHCのすべての絵は simpl.modelの特定のパラメータを指定したとき「のみ」有効.

Else?

おまけ：信仰の墮落その2



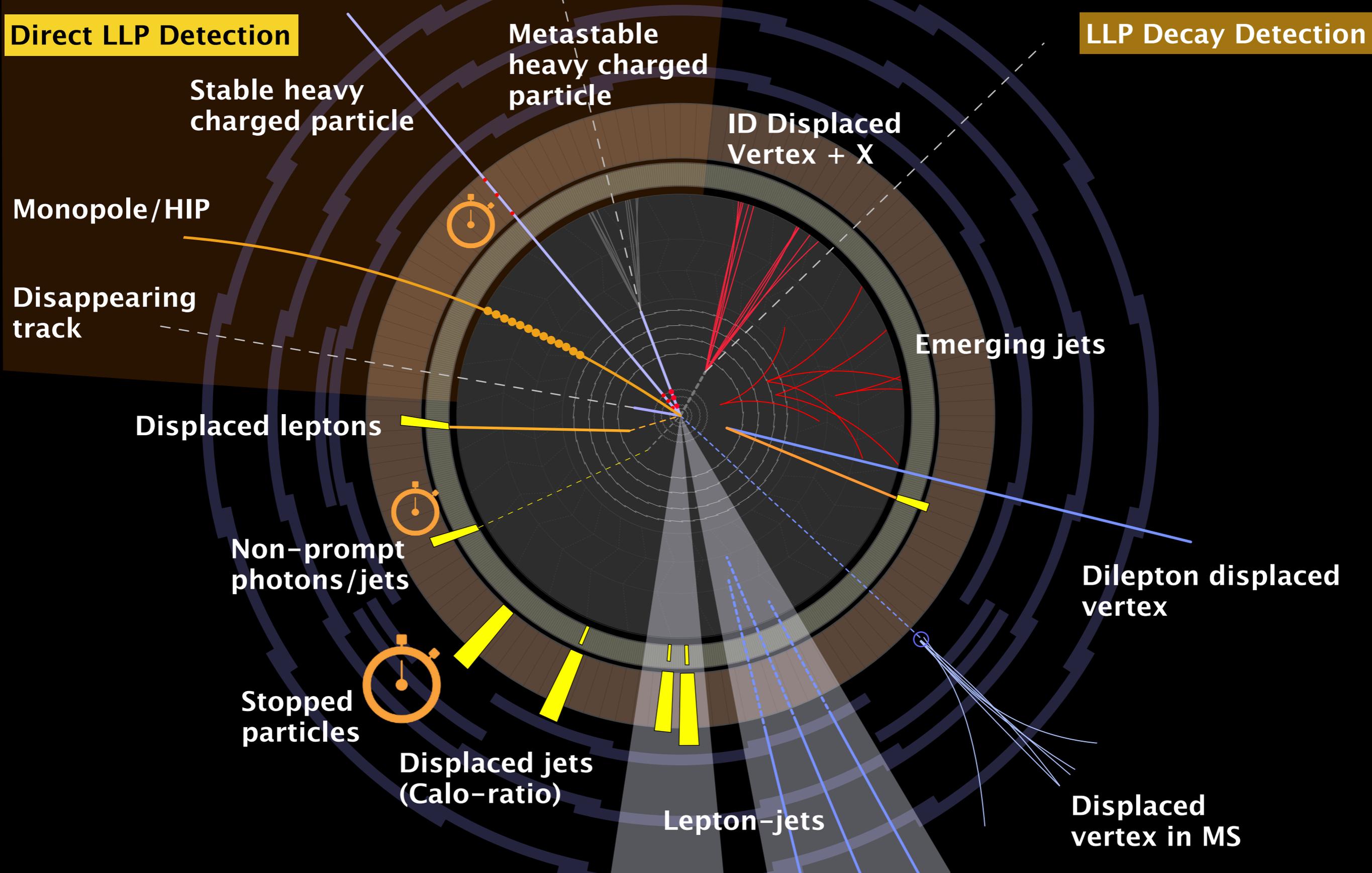
- ★ 今まで WIMP miracle に引きずられて直接的な DM-SM interaction を考えてきたが、もしかして**WIMPではない**のかもしれない.
- ★ 例えば **FIMP** (Feebly-Interacting Massive Particle) に基づく **freeze-in** [ex.:[1706.07442](#)].
 - ★ 熱浴に DM が平衡であった通常の WIMP とは逆に、初期状態ではゼロ DM abundanceからスタートする.
 - ★ 何か SM と結合する DM の親粒子 “ Y ” を仮定し、これは初期状態で SM と平衡になっているとする. Y は DM χ との間に**きわめて微小な**結合 (例えば $yYX_{SM}\chi$) があり、崩壊 $Y \rightarrow X_{SM} + \chi$ を通じて DM が少しずつ作られて溜まっていく. DM は SM とのあいだでは熱平衡に至らない.
 - ★ $\Omega_\chi h^2 = 0.12$ に達した時点で Y が枯渇して DM χ が残る.
- ★ この場合 DM-SM 結合が非常に弱く、DD (直接検出) では**まず見つかる見込みがない**が、親粒子 Y はSMと結合するので **LHC では作られる**可能性がある.
- ★ Feeble coupling のために Y の寿命は長いかもしれない → **長寿命粒子**の可能性

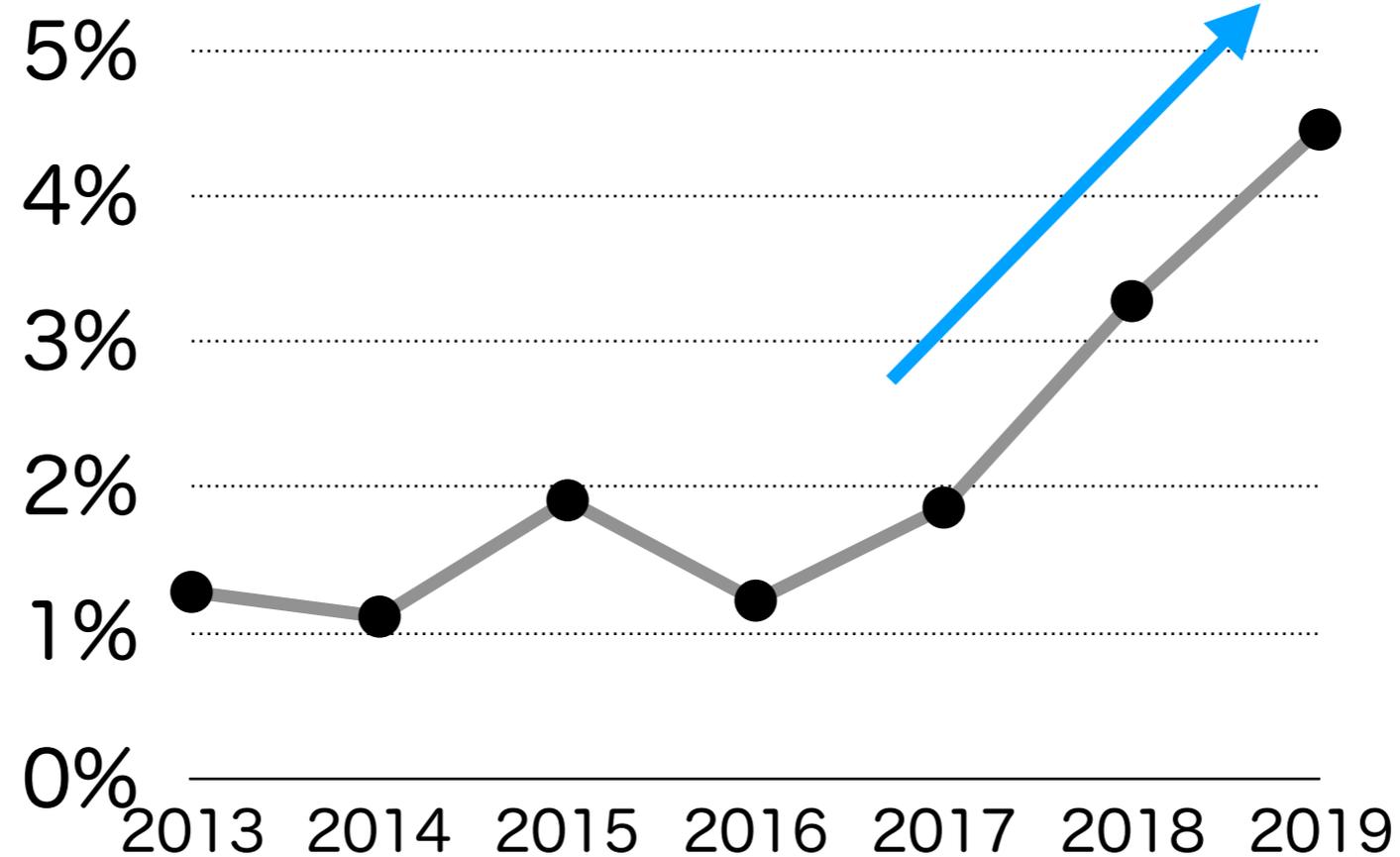




Direct LLP Detection

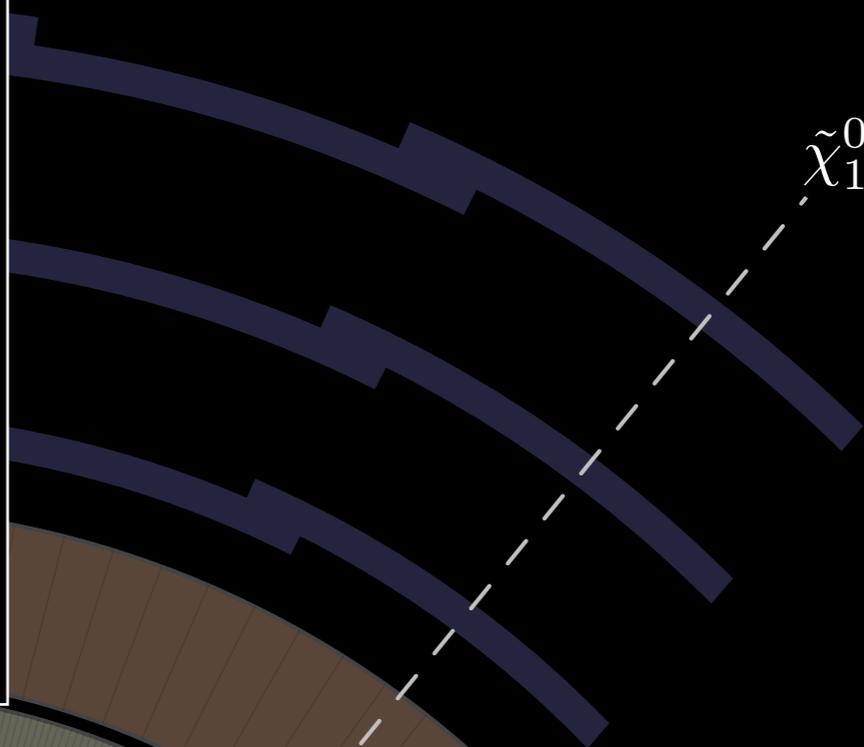
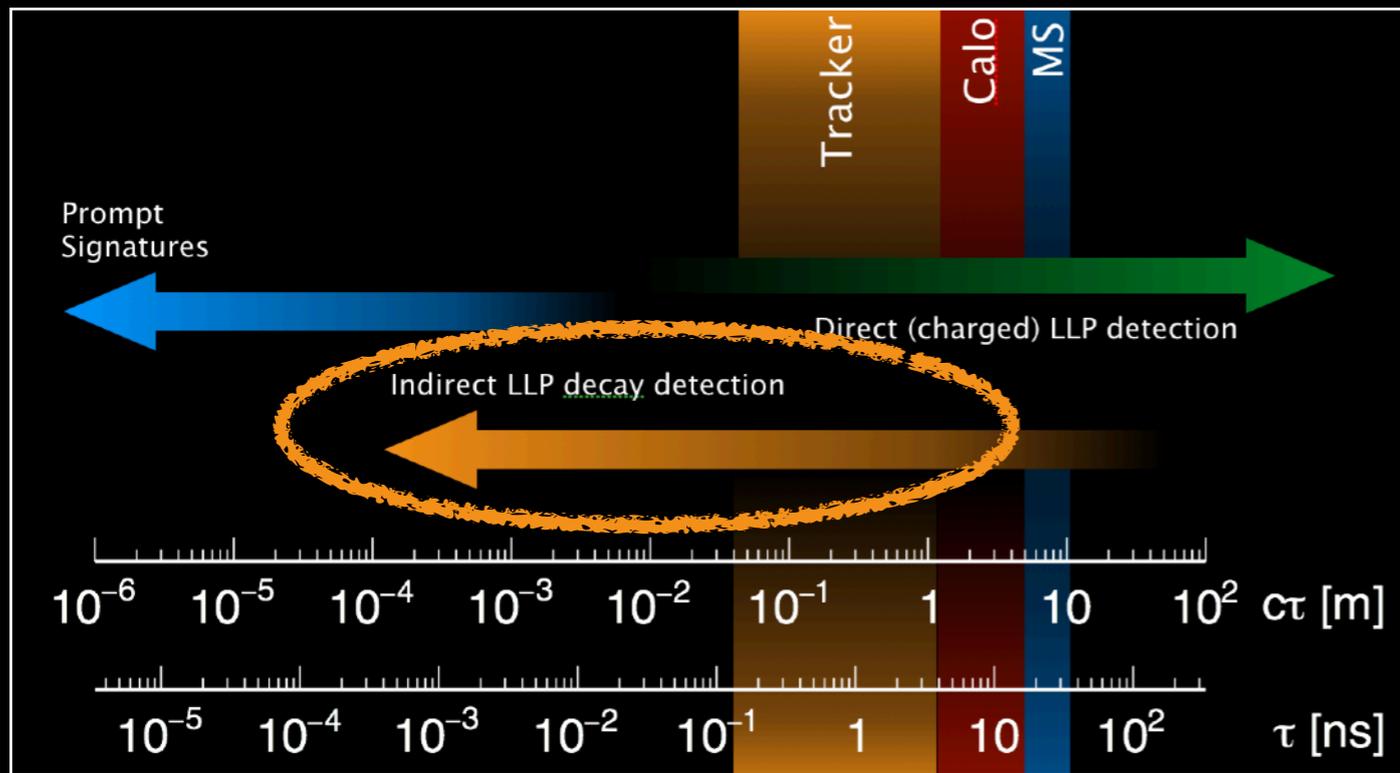
LLP Decay Detection





arXiv投稿記事のうち概要に "long lived, LHC" を含む件数の "Higgs" を含む件数に対する比の年次推移. 分母は約1,300—1,600 件/年程度である.

Complementarity



Almost agnostic of the decay property

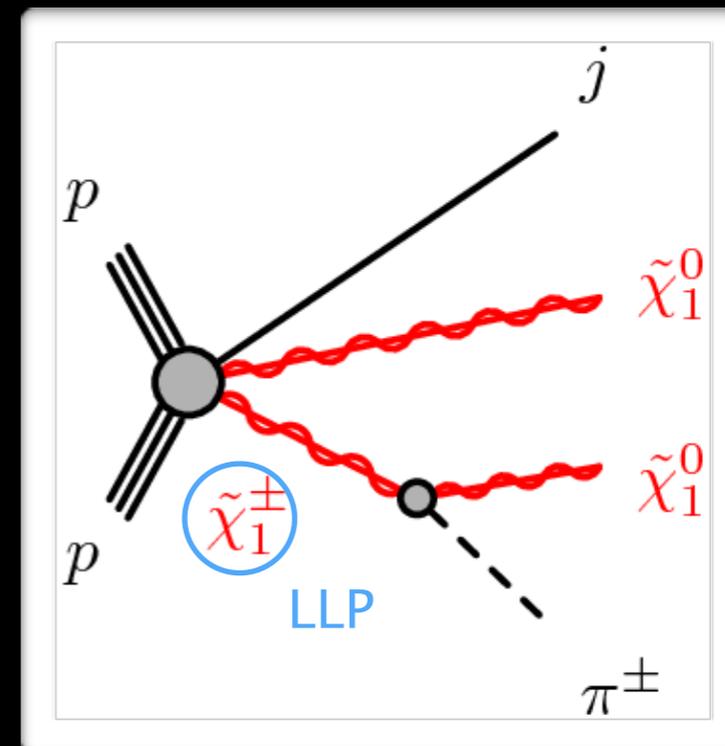
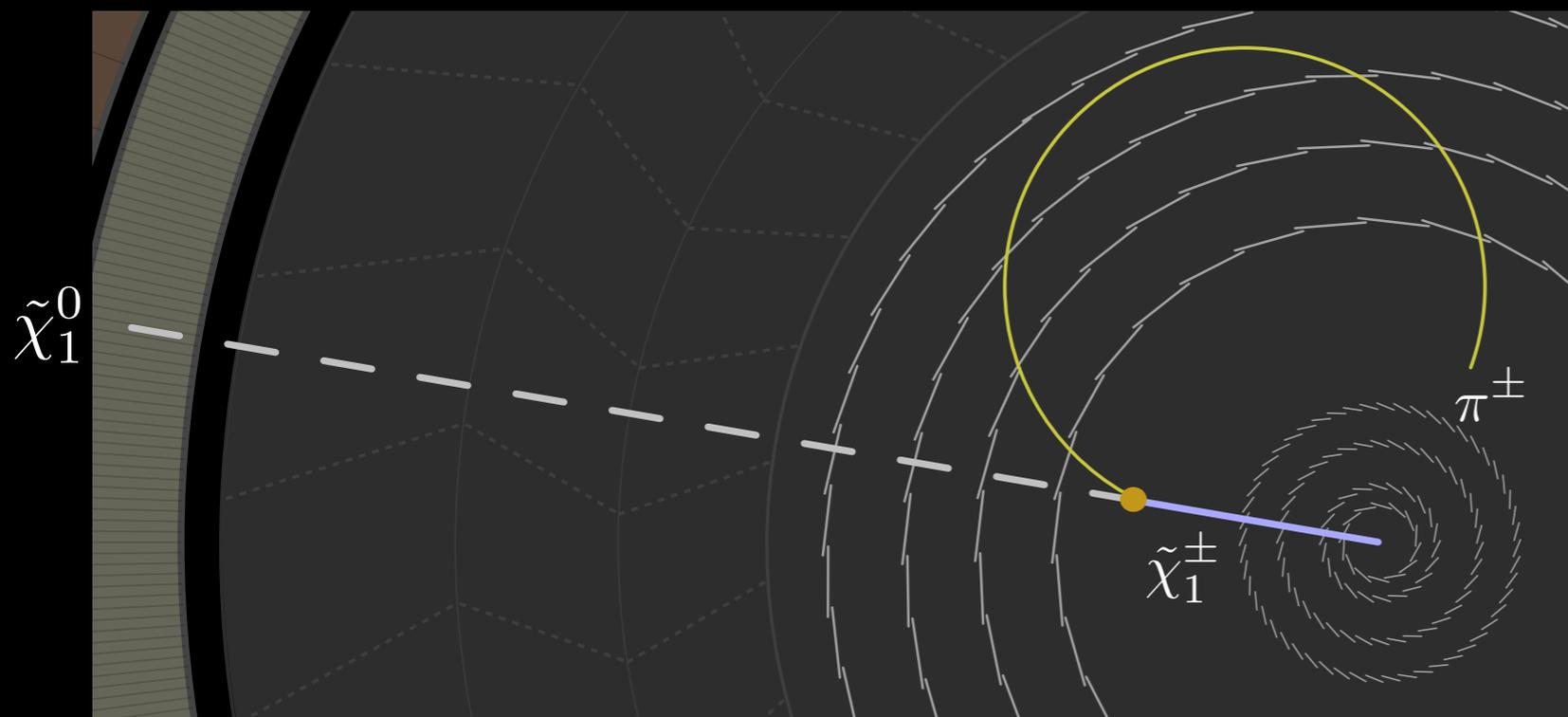
Requires min. #hits
Needs longer lifetime

Only sensitive to charged LLP

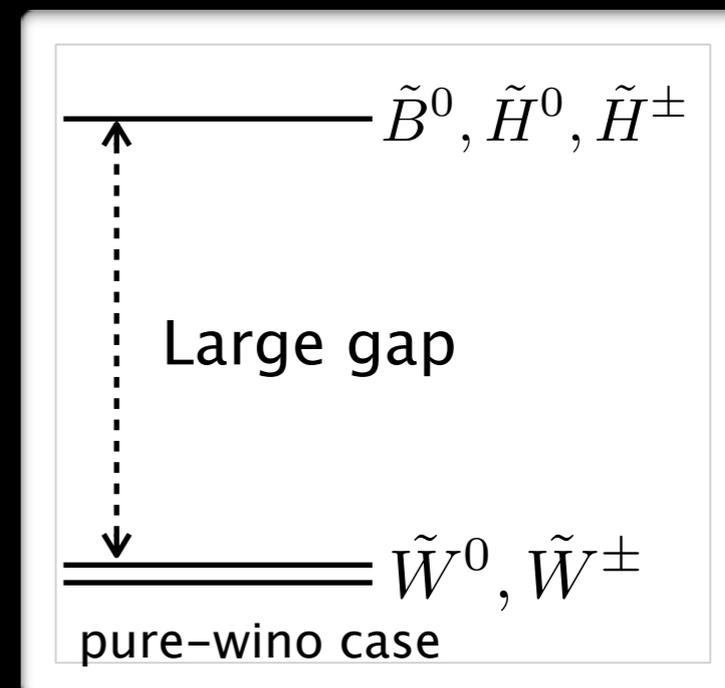
Reconstruct properties of the decay product system

DV position can be quite close to PV

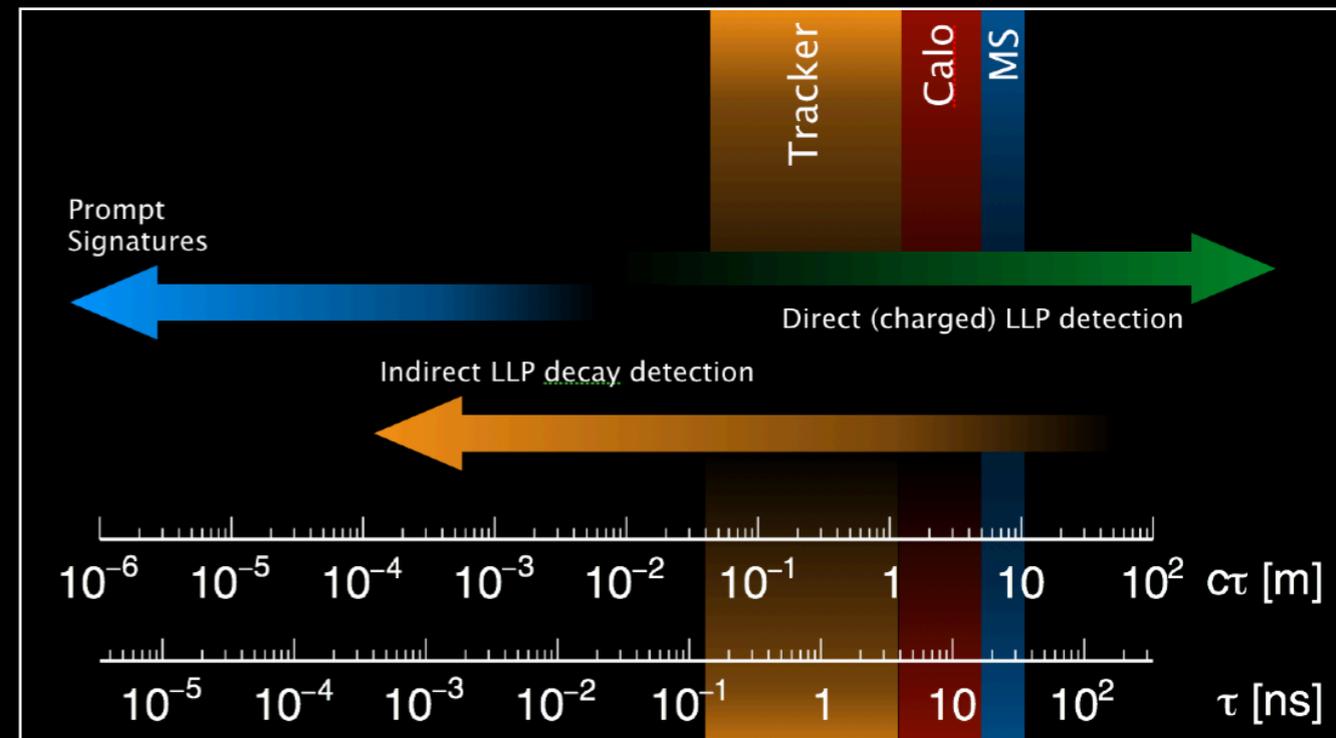
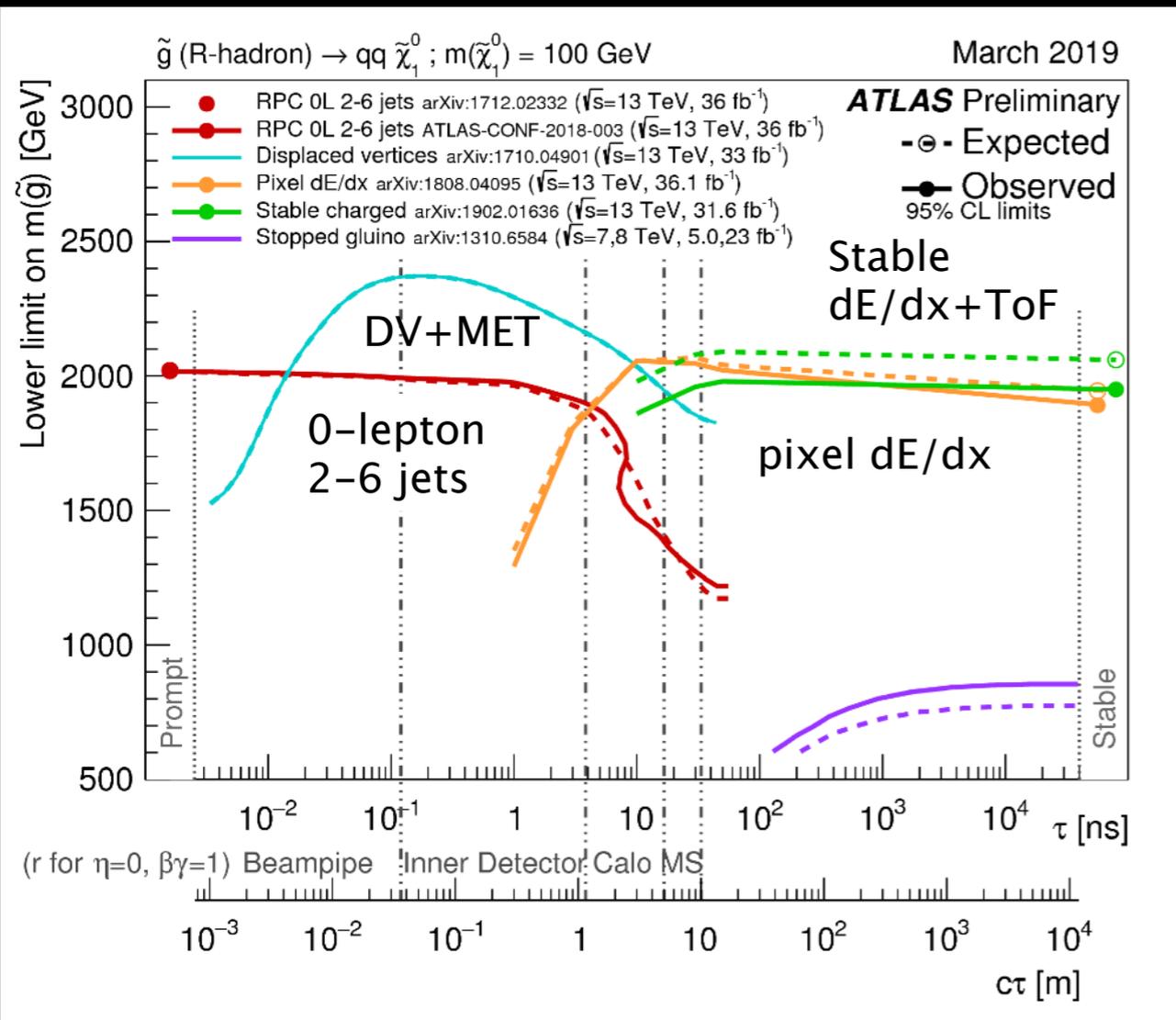
Agnostic of the LLP property (e.g. charge)



- ★ Degenerate chargino—neutralino mass splitting (AMSB, pure higgsino). → Chargino as LLP.
- ★ Motivated for very short lifetime of $O(0.1\text{ns})$ → pixel-only tracking “tracklet”.
- ★ Decay pion is extremely challenging to reconstruct and practically invisible. → the disappearing track signature (a well-isolated tracklet).
- ★ For EW production, requiring ISR for effectively boosting the system to gain the decay length.
- ★ Also looking at the strong production channel as the second SR.



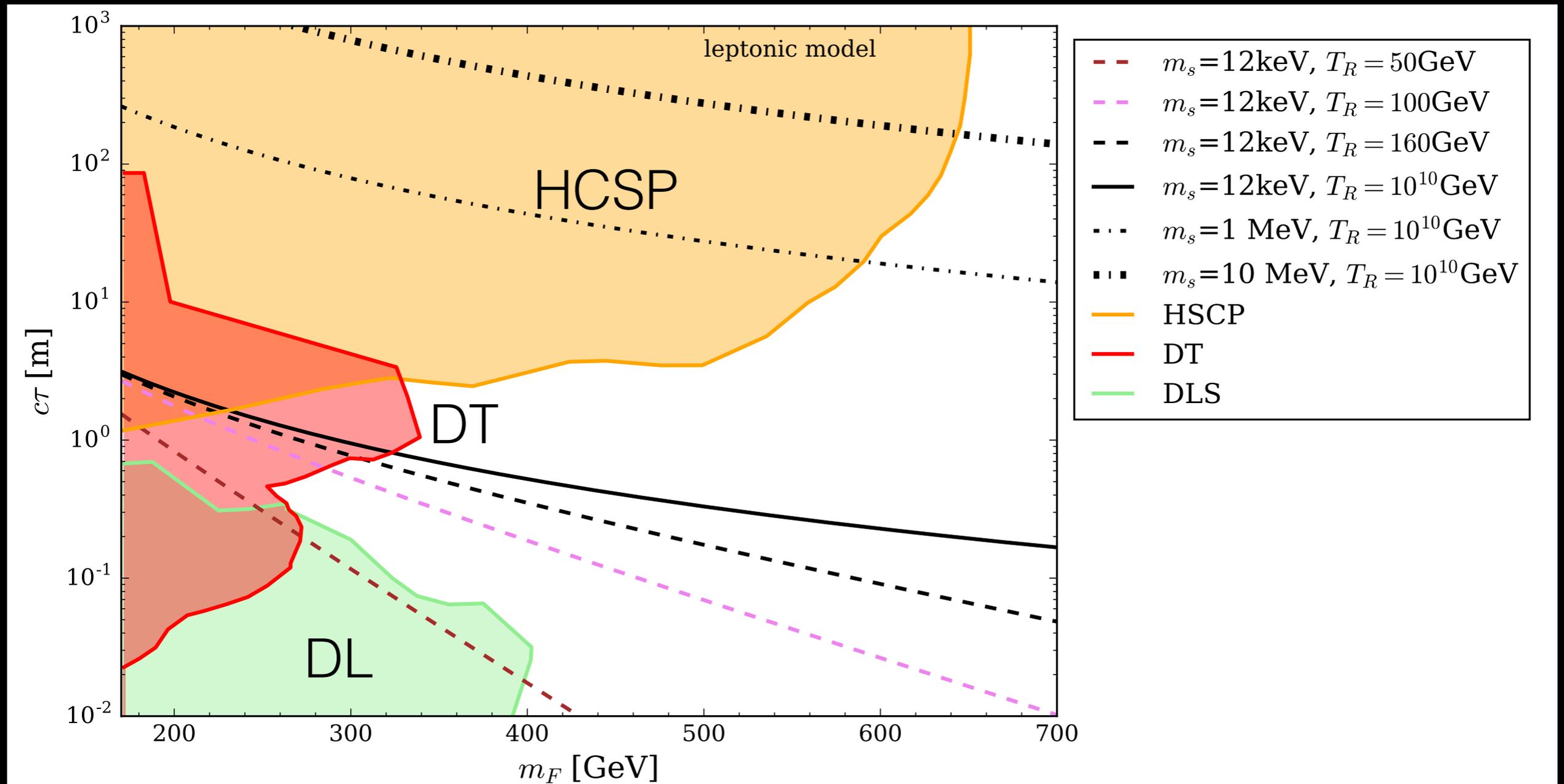
R-hadron search summary



- ★ Each analysis has advantages in different lifetime ranges.
- ★ A very good complementarity over wide lifetime range.

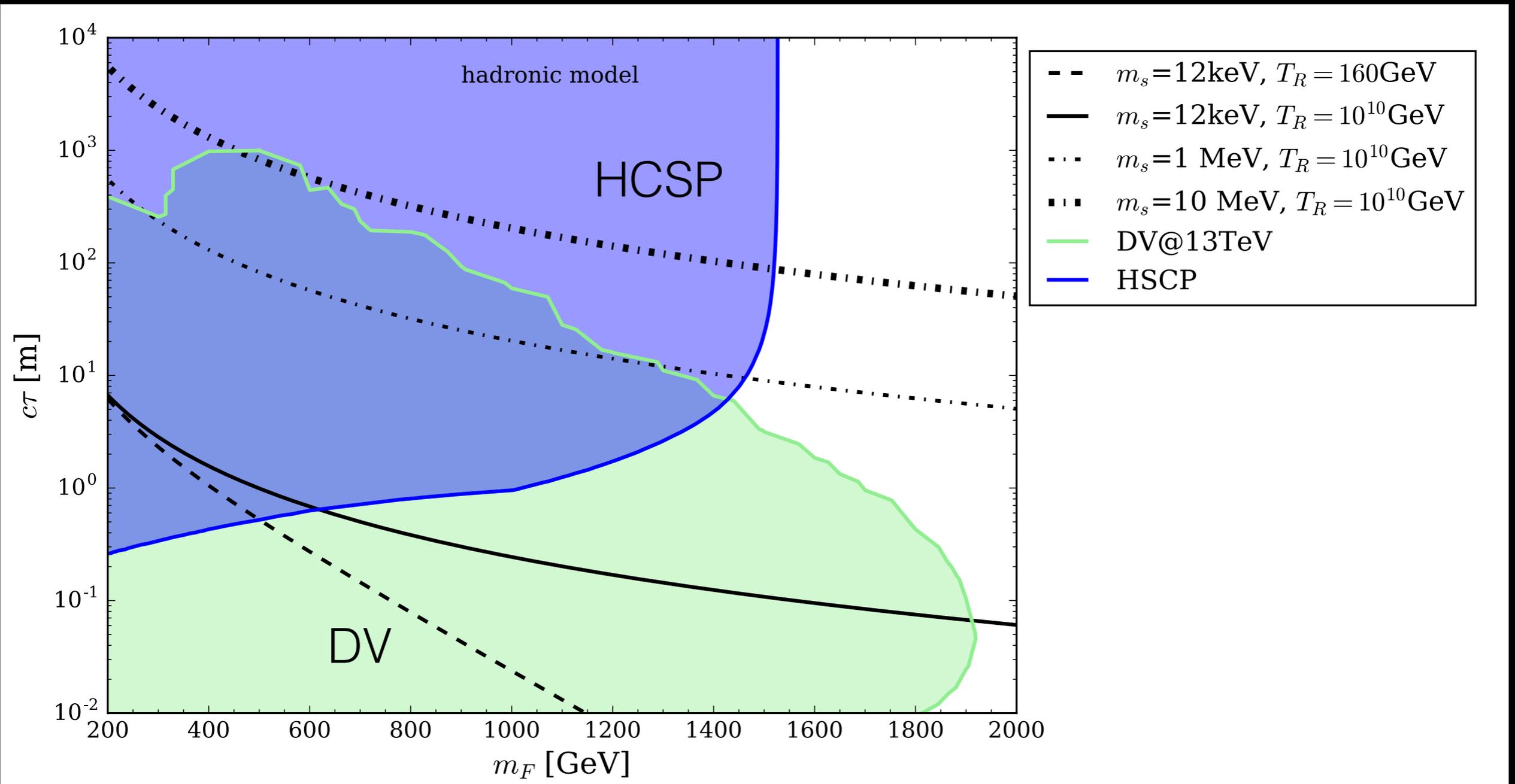


[Belanger et al. JHEP 1902, 186 \(2019\)](#)



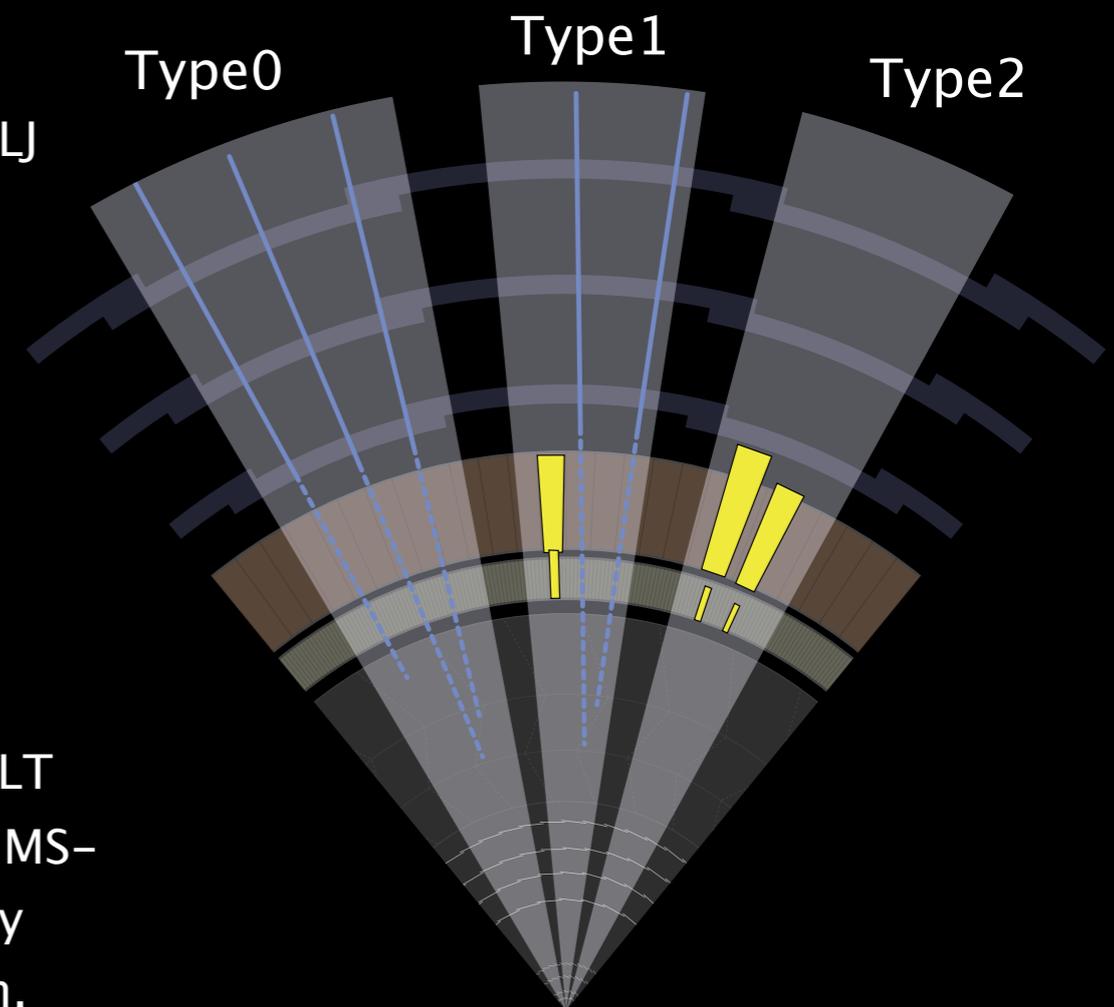
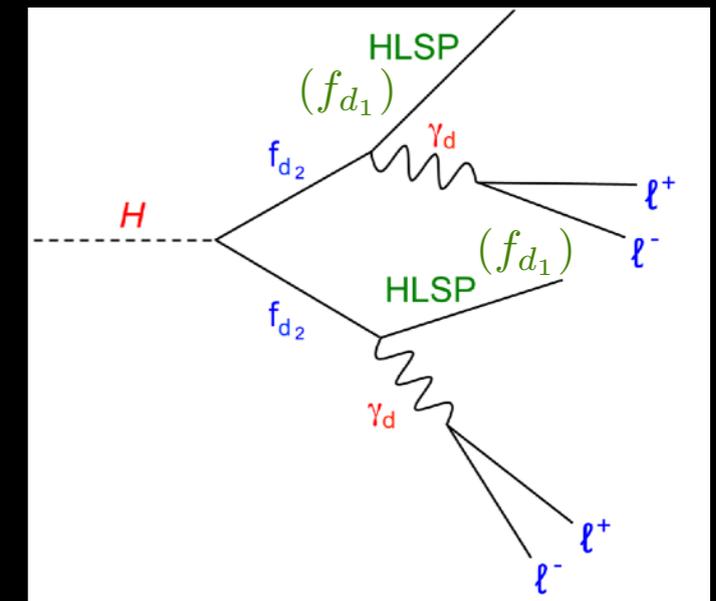


[Belanger et al. JHEP 1902, 186 \(2019\)](#)



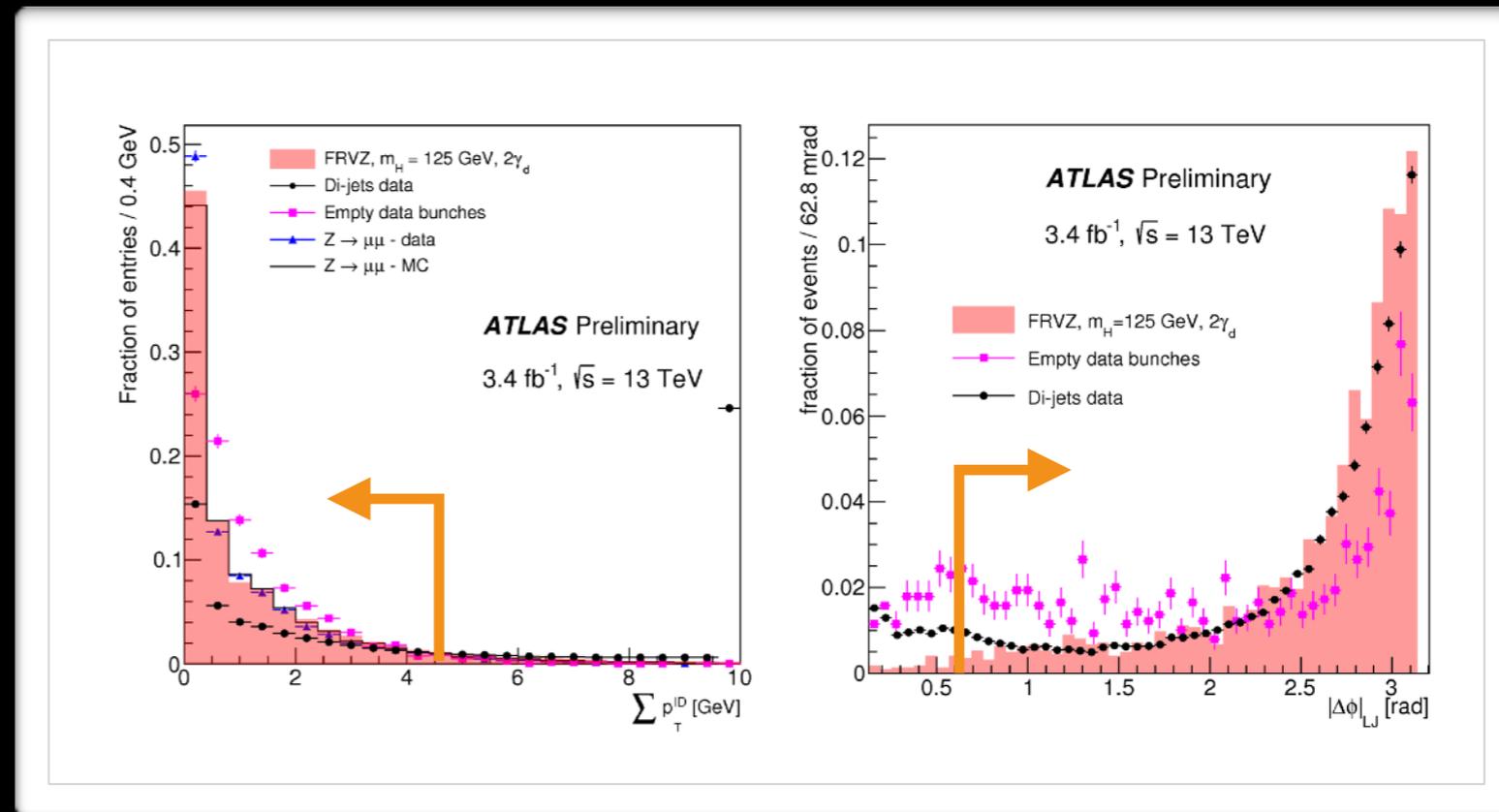
Leptonic LLP decays: displaced lepton-jets

- A light (MeV—GeV) dark photon mixing with SM photon decays to lepton pairs or to light mesons.
- Collimated flow of displaced particles including leptons: displaced lepton-jets (dLJ).
- Benchmark: higgs portal, decaying to dark fermion pairs producing dark photons.
 - Case1: $f_{d2} \rightarrow f_{d1} + \gamma_D$, ($\gamma_D \rightarrow \text{dLJ}$): up to $2\mu / \text{dLJ}$
 - Case2: $f_{d2} \rightarrow s_{d1} + f_{d1}$, $s_{d1} \rightarrow \gamma_D \gamma_D$ ($\gamma_D \rightarrow \text{dLJ}$): up to $4\mu / \text{dLJ}$
- Multiple dLJ types:
 - Type0: muonic (clean ≥ 2 collimated muons)
 - Type1: mixture (collimated muons + 1 jet)
 - Type2: a jet w/o muons, but CaloRatio required.
- Dedicated trigger objects for dLJs
 - 2015 result: muon “narrow scan” trigger: the dedicated HLT for single-dLJ trigger. A 20 GeV L1 muon is confirmed as MS-only at HLT; then ask for the existence of the 2nd MS-only muon of 6—15 GeV in $\Delta R < 0.5$ around the primary muon.

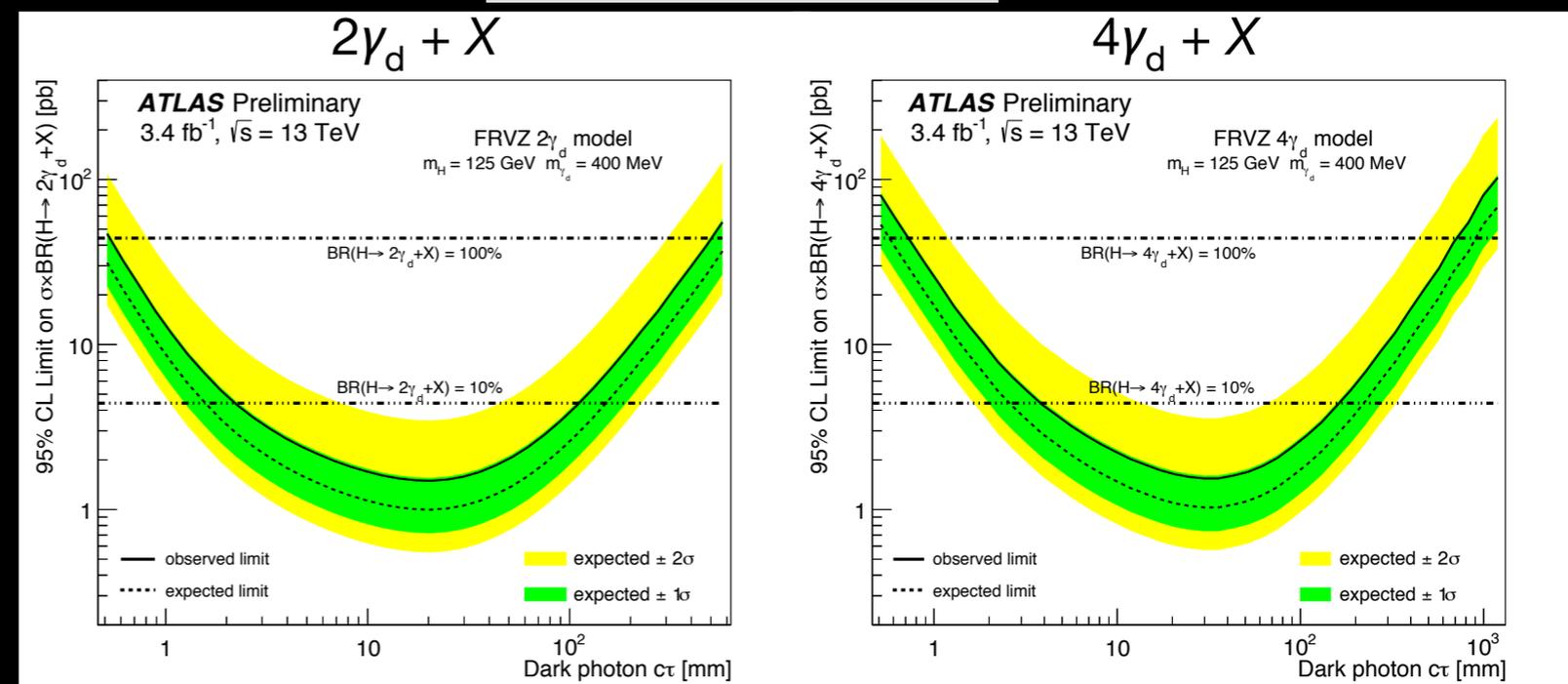


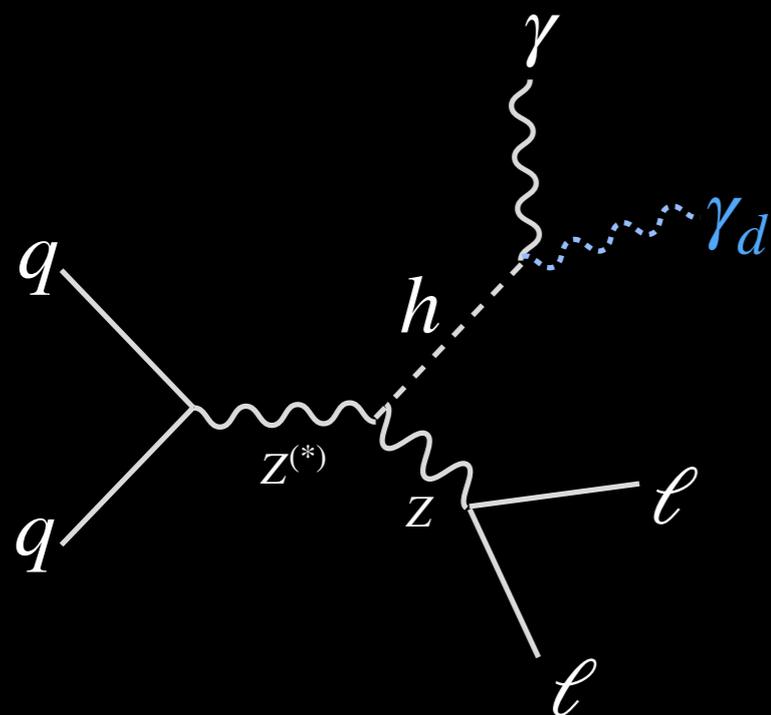
Leptonic LLP decays: displaced lepton-jets

- Requiring 2 LJs in the event.
- 5 LJ-type combinations used:
(T0, T0), (T0, T1), (T0, T2),
(T1, T1), (T1, T2).
- Major backgrounds: cosmic showers and QCD di- and multi-jets.
- No excess observed in 2015 results: upper limit to $\sigma \times \text{BR}$ for $h \rightarrow 2\gamma_D + X$ and $H \rightarrow 4\gamma_D + X$ for $m_H = 125$ and 800 GeV.
- Comparable sensitivity to the 8 TeV 20 fb⁻¹ result, despite ~15% of $\int L dt$, thanks to improvements in trigger and reconstruction efficiency of collinear muons.



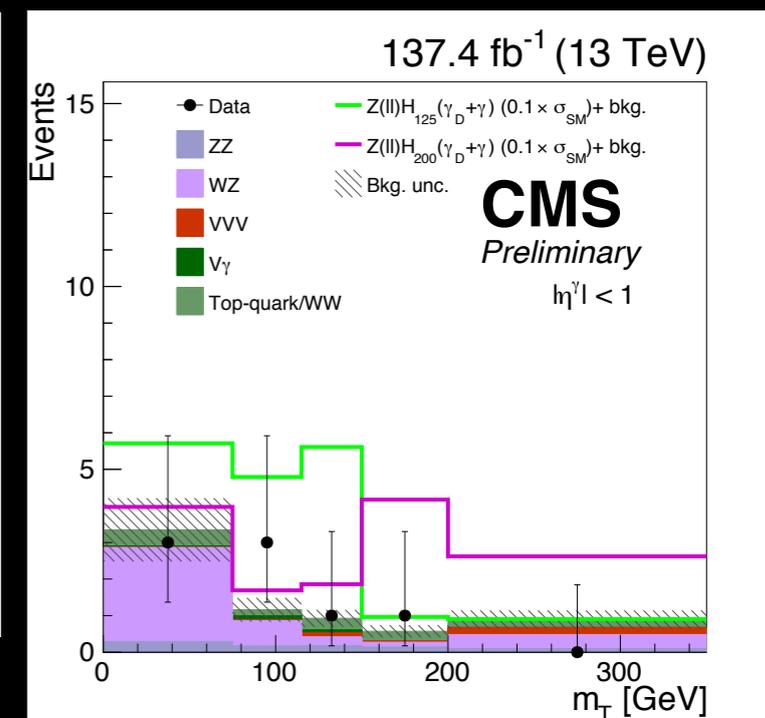
125 GeV Higgs ggF





Process	Yields
Data	14
Nonresonant bkg.	2.4 ± 1.1
WZ	8.1 ± 2.0
ZZ	1.5 ± 0.3
Z γ	0.7 ± 0.7
Other bkg.	0.6 ± 0.3
Total bkg.	13.3 ± 3.8
ZH ₁₂₅ (BR=10%)	17.9 ± 1.2 (1.42 ± 0.09 %)
ZH ₂₀₀ (BR=10%)	12.3 ± 0.8 (4.32 ± 0.28 %)
ZH ₃₀₀ (BR=10%)	3.9 ± 0.2 (6.80 ± 0.34 %)

CMS-EXO-19-007

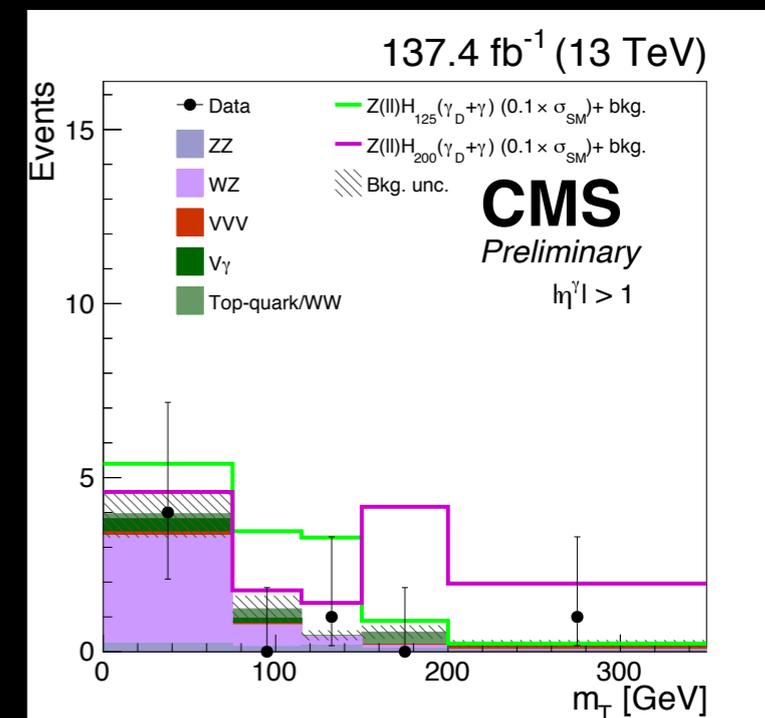


★ Dark photon: additional U(1) to SM, a natural portal to dark sectors.
SM photonとkinetic mixingを起こす。

★ Signal selection

- ★ Exact dileptons, $p_T^{1,2} > 25, 20$ GeV, $|m_{\ell\ell} - m_Z| < 15$ GeV
- ★ Photon: ≥ 1 $E_T^\gamma > 25$ GeV
- ★ $E_T^{\text{miss}} > 110$ GeV, $m_T < 350$ GeV, $m_{\ell\ell\gamma} > 100$ GeV

$$B(h \rightarrow \gamma \text{ inv}) < 4.6 \%_{\text{obs}} \quad (3.6 \%_{\text{exp}})$$





- ★ 一口に「コライダーにおけるDM探索」と言っても広い！ここでは**基本的な系譜やその発展**を概観しました。
SM portal (Higgs portal), Cascading decay (SUSY-LSP),
EFT → simpl.models & many variants, Resonance searches and mediator,
Dark photons, Long-lived particles...
- ★ UV-completion を意識した SUSY を筆頭とする **BSM 理論**とは別に「**DMさえ作れば良い**」という **bottom-upな発想** からスタートしている探索の一派がある。Run1でのEFTでの経験を踏まえて再解釈に便利・かつ面白いsignatureを作るような **simpl.model が勧告**され、それに基づいてRun2をやってきた。
- ★ III-formedな **simpl.model の理論面での欠点**を突く形でもう少し込み入ったモデルが提案され、それに伴って**多様な探し方が開拓**されてきましたが、現時点では有意なexcessは見つかっていません。
 - ★ 特に **resonance (mediator) search が強力**で、simpl.modelに乗っかる限り mono-X を motivate していく、という印象（解釈を外せば独立の探索なので、実験としての意味が失われるわけではない）。
- ★ Simpl.modelを用いたDD/IDとの比較は**仮定するmediatorや結合定数に強依存**で消化（絵の見方）が難しいが、概ねLHCでDM探す相補性は、**low-mass**や**spin-dependent**な場合にあるということがわかるので、LHCでの制限にはDD/IDと合わせてやっていく一定の意味があると思います。

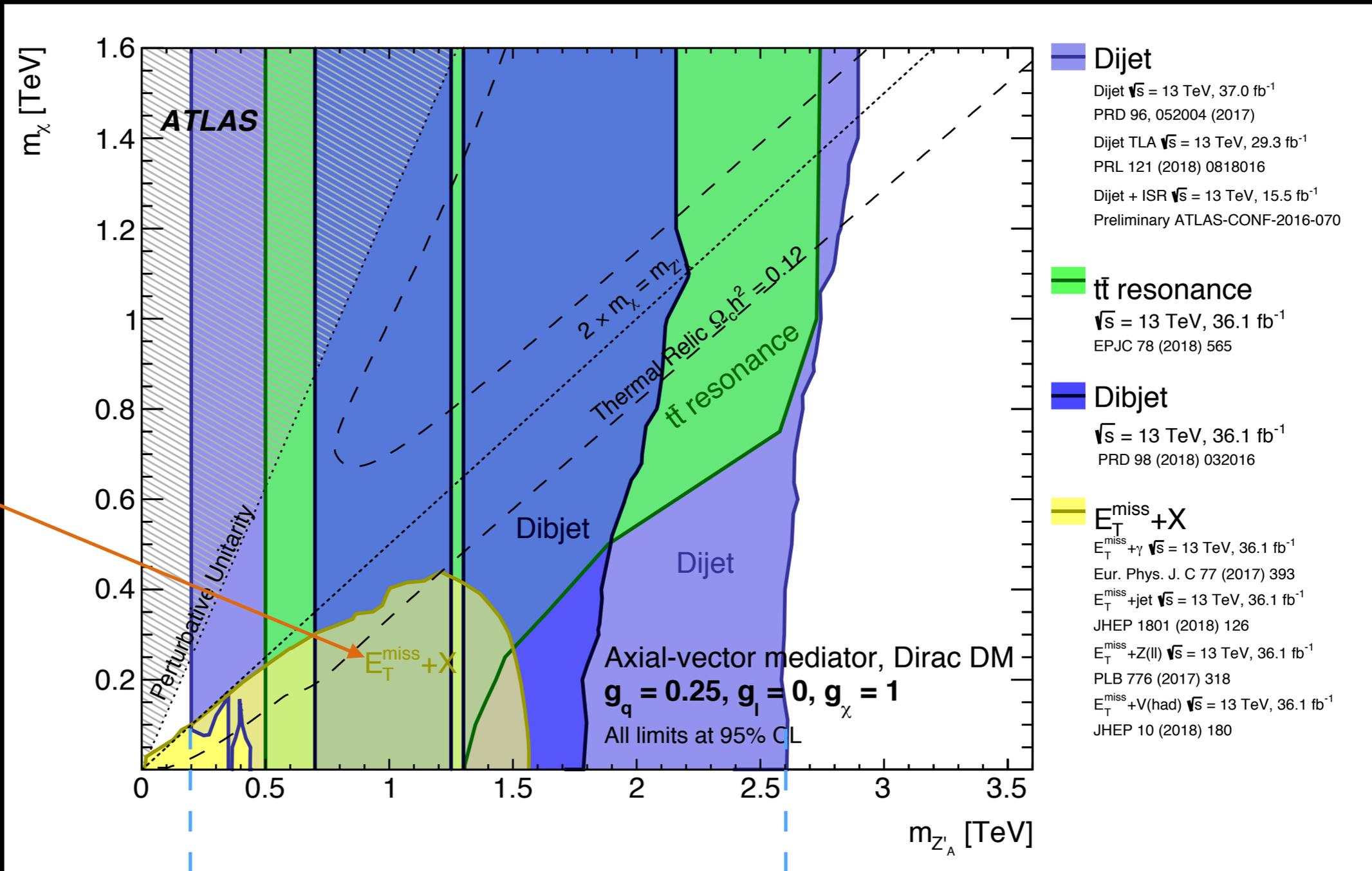


- ★ LHCでは基幹（旗艦）探索チャンネルは旗色がずいぶん悪くなってきたうえ、ルミノシティを稼ぐメリットも急激に逓減している。
- ★ とはいえ、TeVを直接プローブできるマシンであることは短期的には変わらない。
- ★ LHCに参加する個々人のテクニックを総動員してLHCで探索できることの最大限を目指したい。
- ★ 「絨毯爆撃」から脱却して、「魅力的なシナリオ・Low Bkg・creativity」があるようなsweet spotを狙い撃ちする、効果的な探索を積極的に開拓していくことが重要ではないかと思えます。

Spare

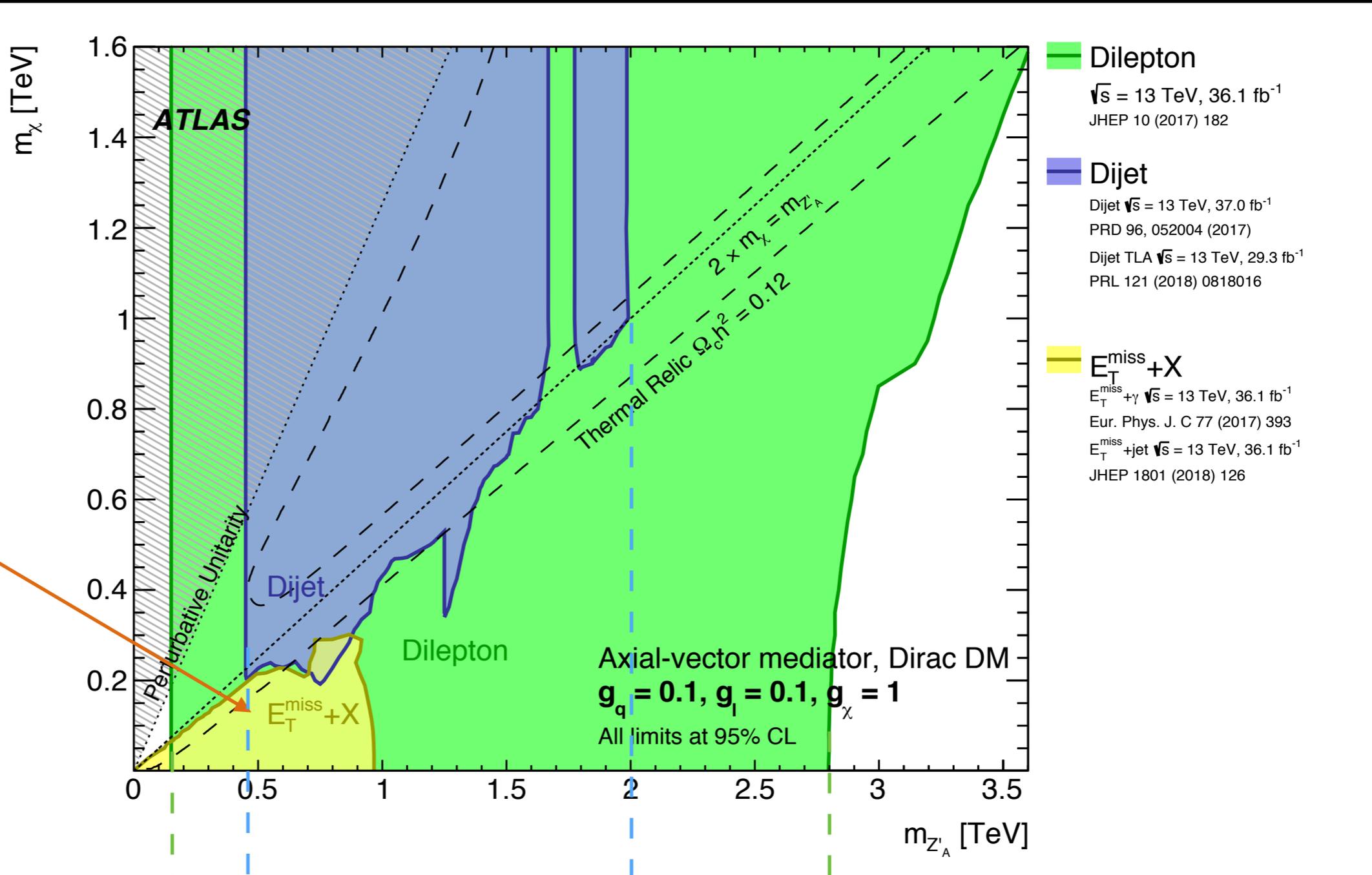


もともとの
mono-Xでの
DM探索



← dijet resonance →

Axial Vector, Leptophobicのケース ($g_q = 0.25, g_\chi = 1.0$)



もともとの
mono-Xでの
DM探索



Axial Vector, Leptophilicのケース
 $(g_q = 0.1, g_l = 0.1, g_\chi = 1.0)$