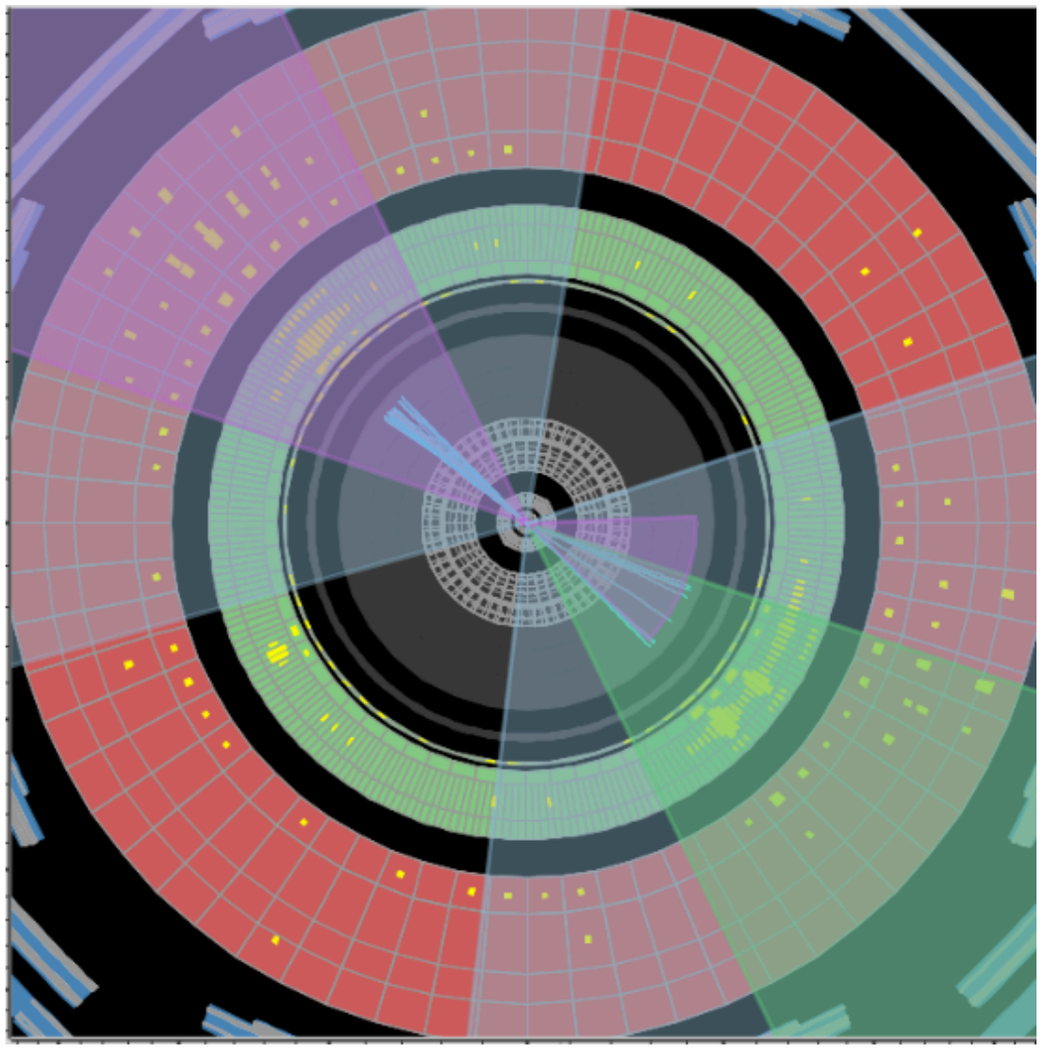


# Latest Results in Top Quark Physics From ATLAS

Riccardo Di Sipio, University of Toronto


# What is the ATLAS Collaboration doing with all these Top Quarks?

Riccardo Di Sipio, University of Toronto

# Why Top Quarks?

**Heaviest known particle, only “bare” quark,**
**(meta)stability of the Universe, etc…**

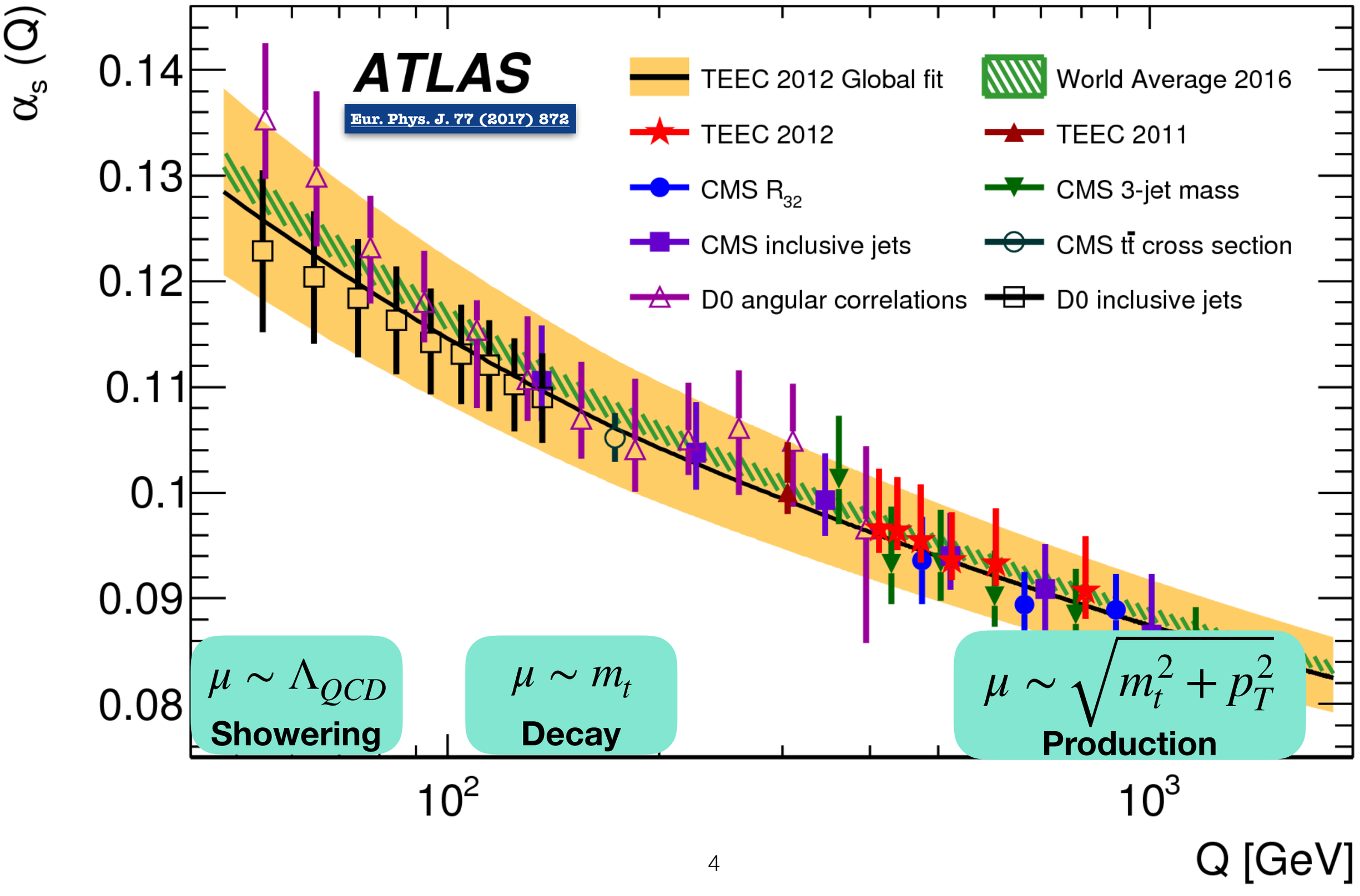
- High statistics allows both **precision measurement** and search for **new physics**.

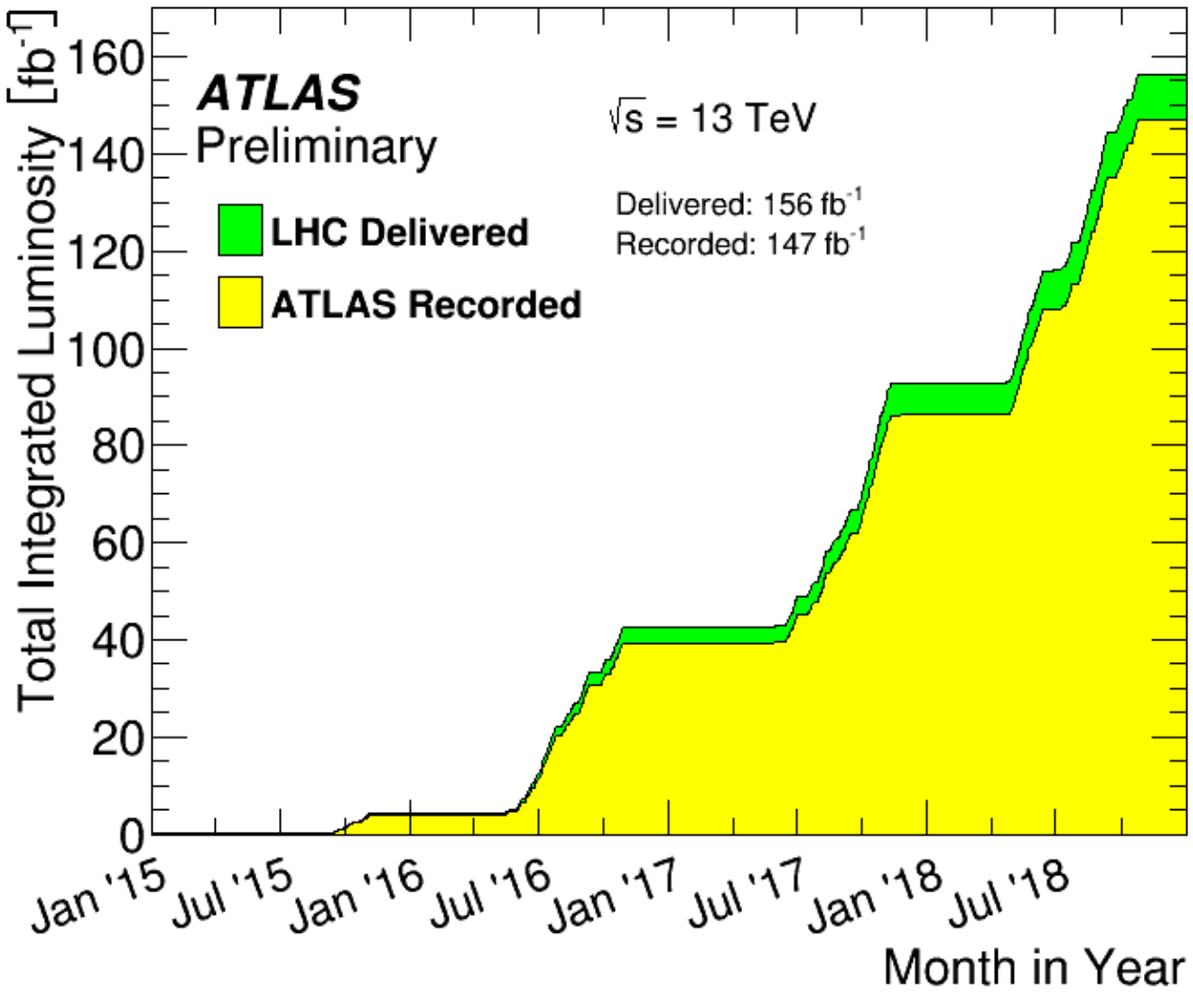
- $t\bar{t}$ complex final state, but **not too complex**, fostering:

  - Theoretical and experimental **advancements**

  - Fine details not yet completely understood: **NNLO** calculations still rather new / not matched to PS, $t\bar{t}$/tW/WbWb **interference** effects, …

# The many scales of top quark physics
# Calculations are complicated!





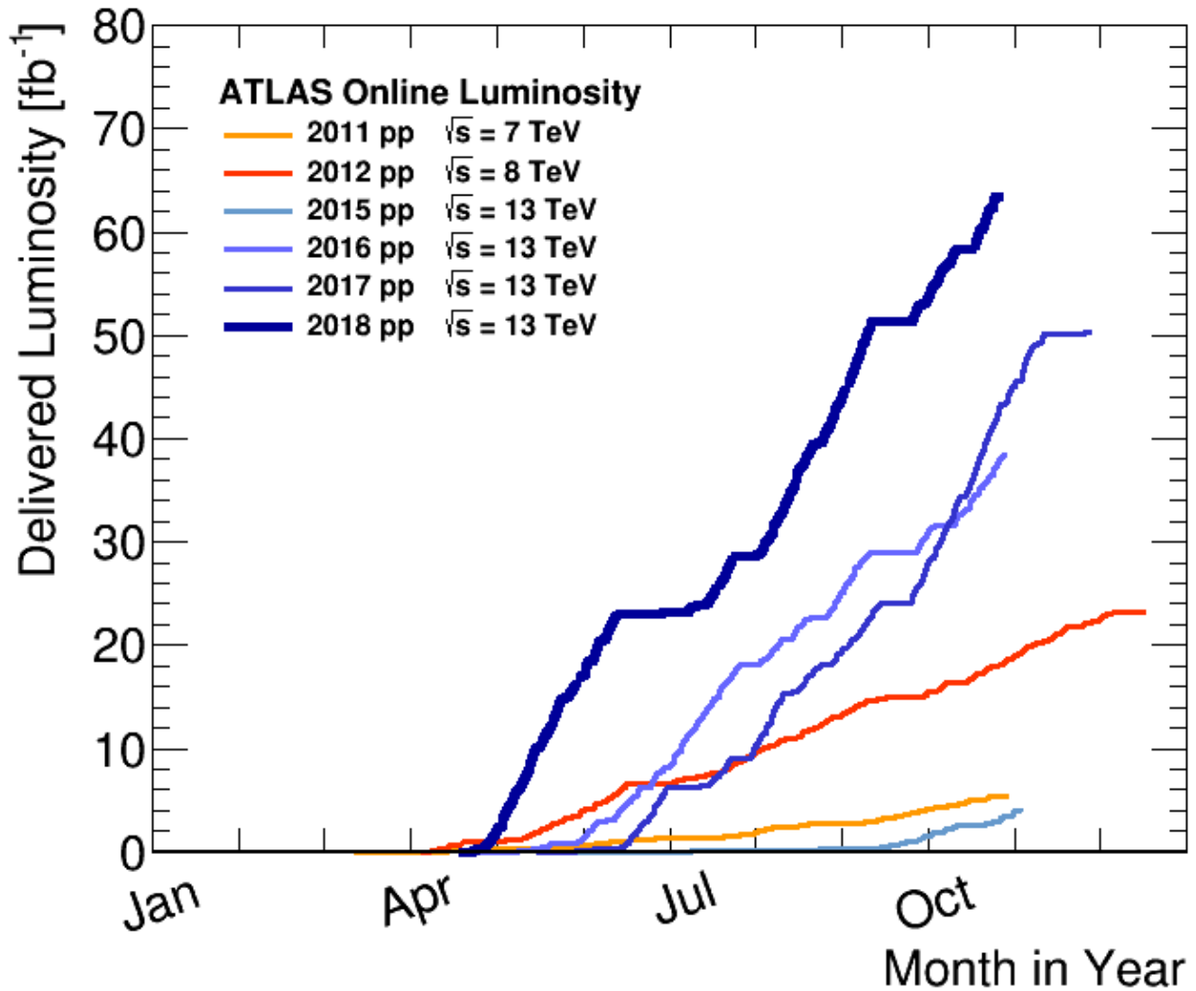

**~150 fb$^{-1}$ at √s = 13 TeV collected in Run 2**

$$N = \mathcal{L} \cdot \sigma_{t\bar{t}}$$

$$\sigma_{t\bar{t}} \sim 830\,\mathrm{pb}$$

$$\mathcal{L} \sim 15 \times 10^{33}\,\mathrm{cm}^{2}\mathrm{s}^{-1}$$

**~750 tt̄ pairs produced per minute**




**Amazing machine & detector performance**

**Only a very small fraction of the total LHC + HL-LHC luminosity collected/analyzed so far!**

# Couplings

**Production cross-section(s)**
**Spin correlation**
**Polarization**
***W* helicity**
**Charge Asymmetry**
**FCNC**

# Mass

**Fundamental parameter of the SM**

# Searches

**Resonant production (Z', $g_{KK}$)**
**Vector-Like Quarks (VLQ)**

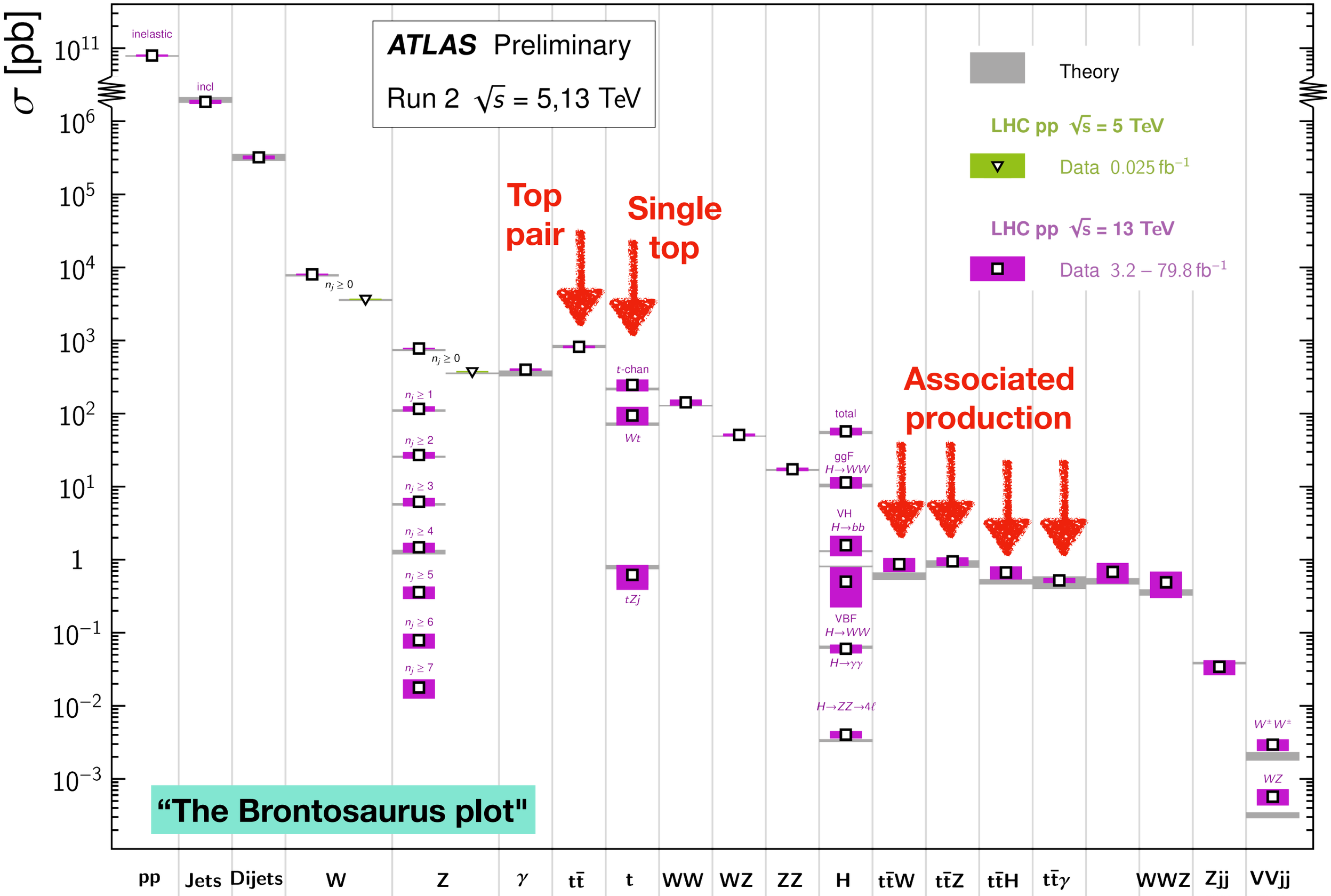
# Cross-Section

**“Can you count how many top quarks are produced?”**

# Looking at the bigger picture…

## Standard Model Production Cross Section Measurements

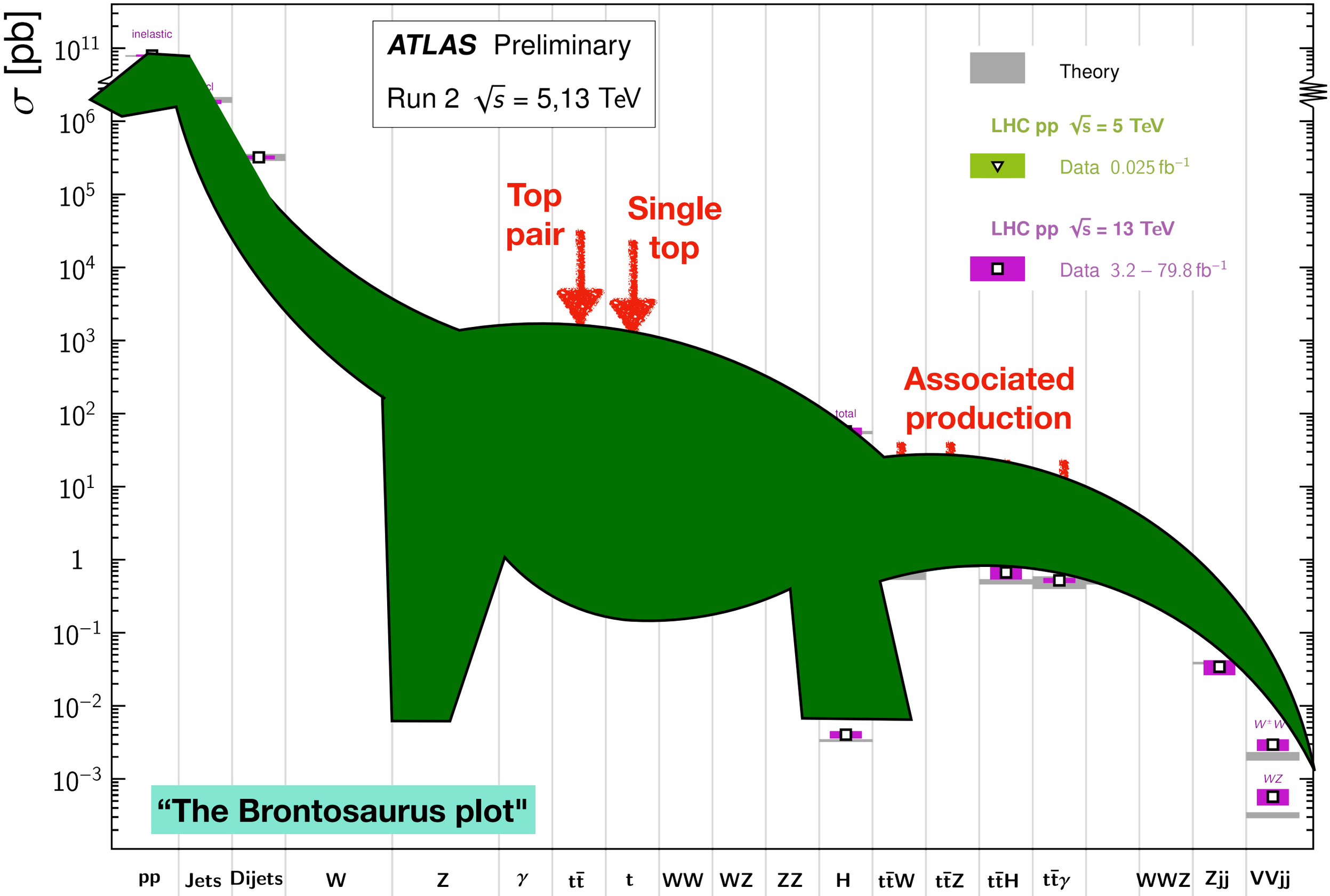
*Status: March 2019*



# Looking at the bigger picture…

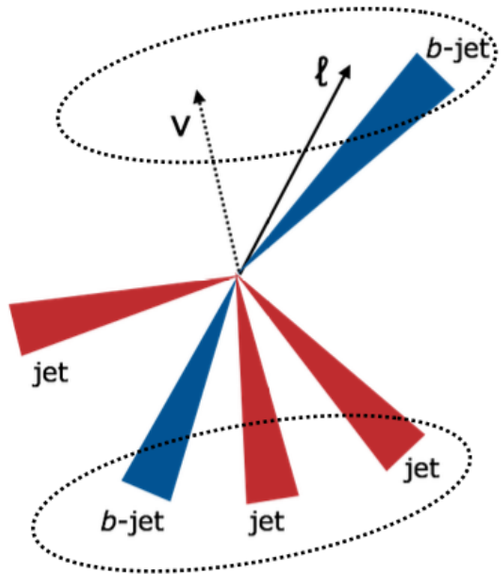
## Standard Model Production Cross Section Measurements

*Status: March 2019*

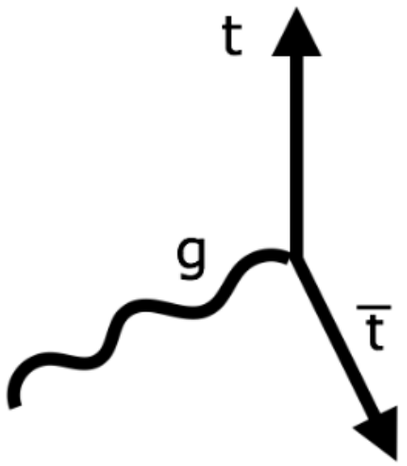


# Comparison with theory

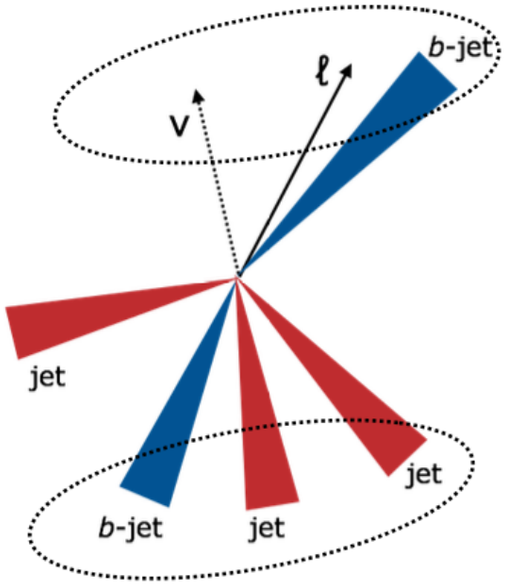
- **Fiducial phase-space**
  - Similar kinematic reconstruction at detector- and particle-level objects
  - Reduce extrapolation uncertainty
  - Valid for all Monte Carlo **event generators**
  - Endpoint of the theoretical prediction




- **Full phase-space**
  - **NNLO+NNLL (+EKW)** accuracy only available by asking to the theorists, slow turnaround
  - Larger **extrapolation** to low-$p_T$, high-η.
  - Observables must be **infrared safe**

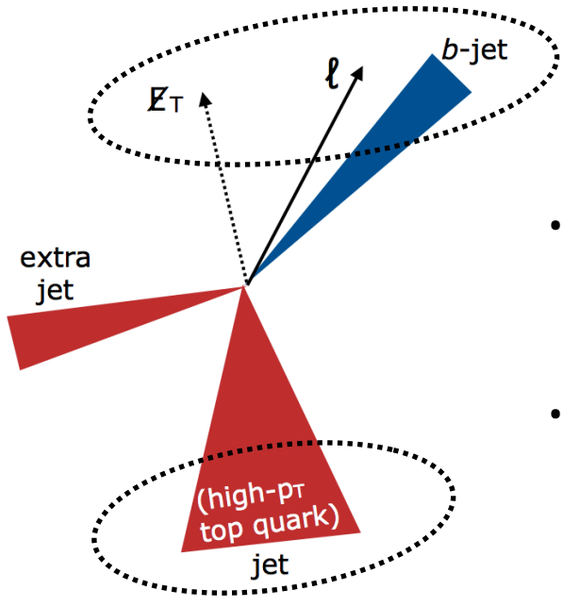


# Kinematic reconstruction



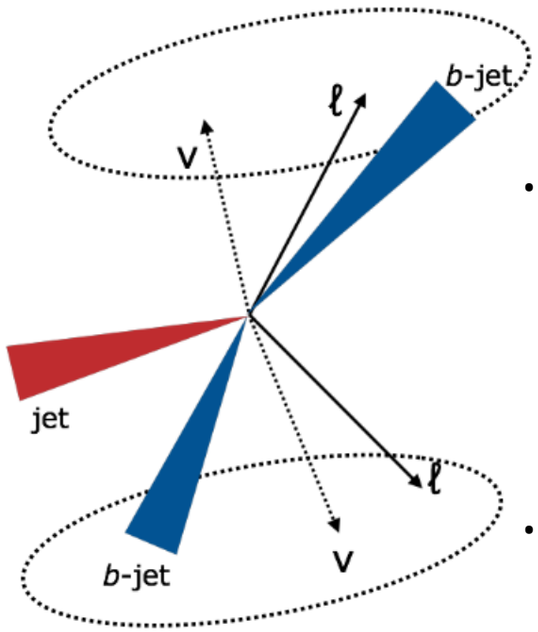

**Single lepton resolved - PseudoTop**

Mass constrains ($m_W$, $m_t$) and b-tagging information to reconstruct decay chain



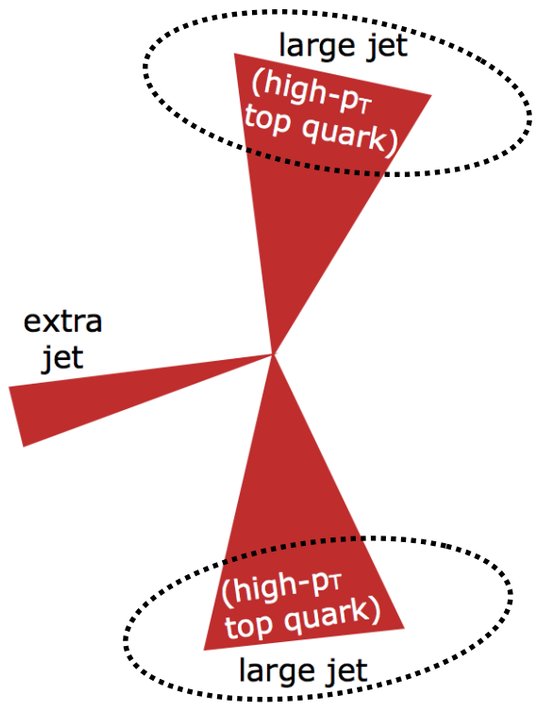

**Single lepton boosted**

- Kinematic constrains to reconstruct $t \to \ell\nu b$
- Hadronic top = large-*R* trimmed jet




**Dilepton Neutrino weighting**

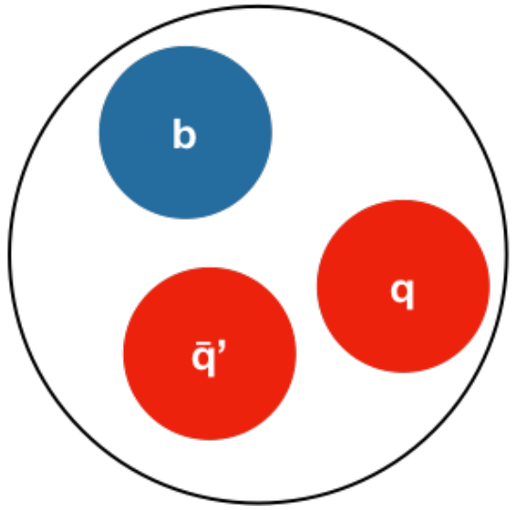
- Kinematic constrains to find optimal longitudinal component of the two neutrinos' momenta [Phys. Lett. B, 752 (2016) 18-26]
- Extra jet may also be photon, $b\bar{b}$ pair



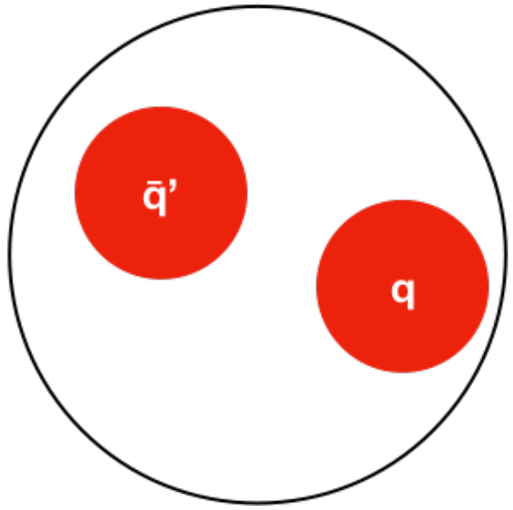

**All-hadronic boosted "double double"**

Top quark candidates = 2 leading large-*R* trimmed massive jets (*b*- and *top*-tagged)

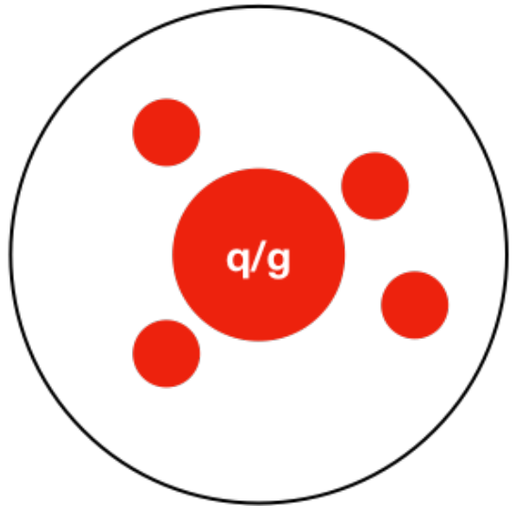
# High-pT (Boosted) Tops




Top quark
Three-prong topology



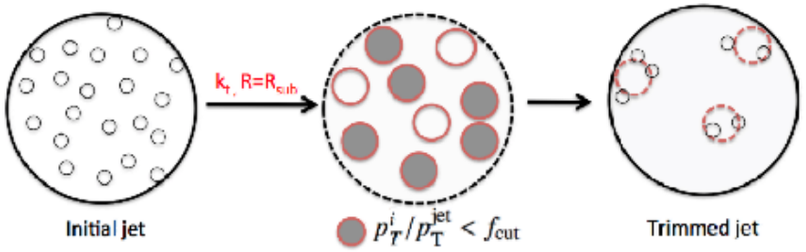

*W* boson
Two-prong topology

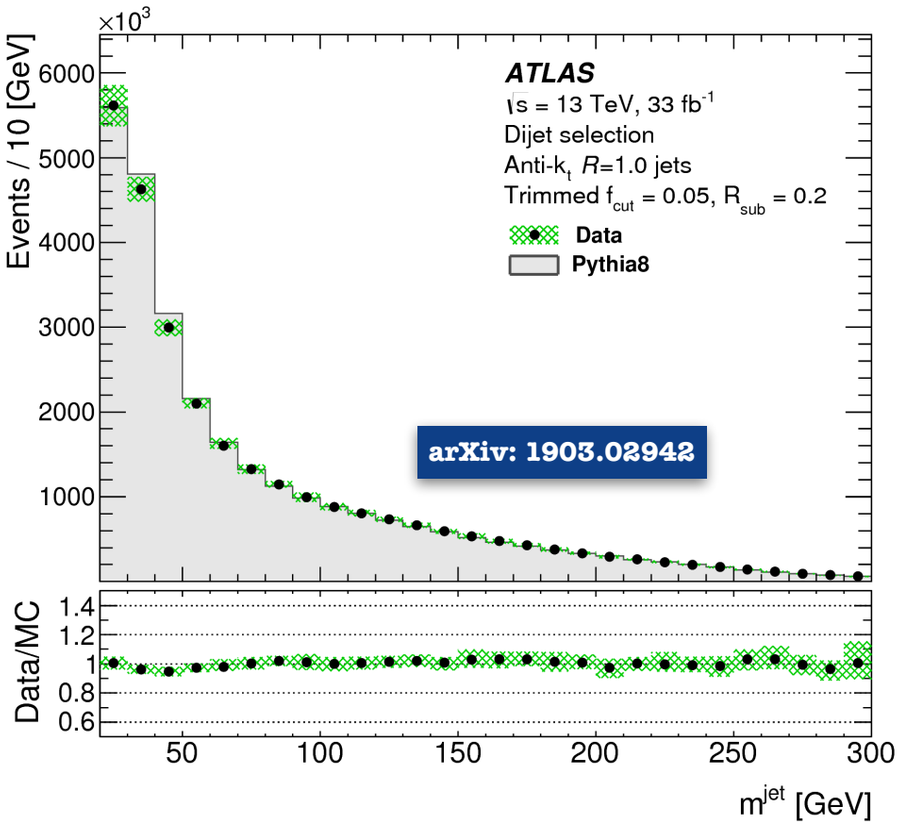



Quark/gluon
Axial topology

**Trimming** Thaler et al., JHEP 1002:084,2010

Removes pileup by discarding R=0.2 subjets with pT < 5% pT(J)



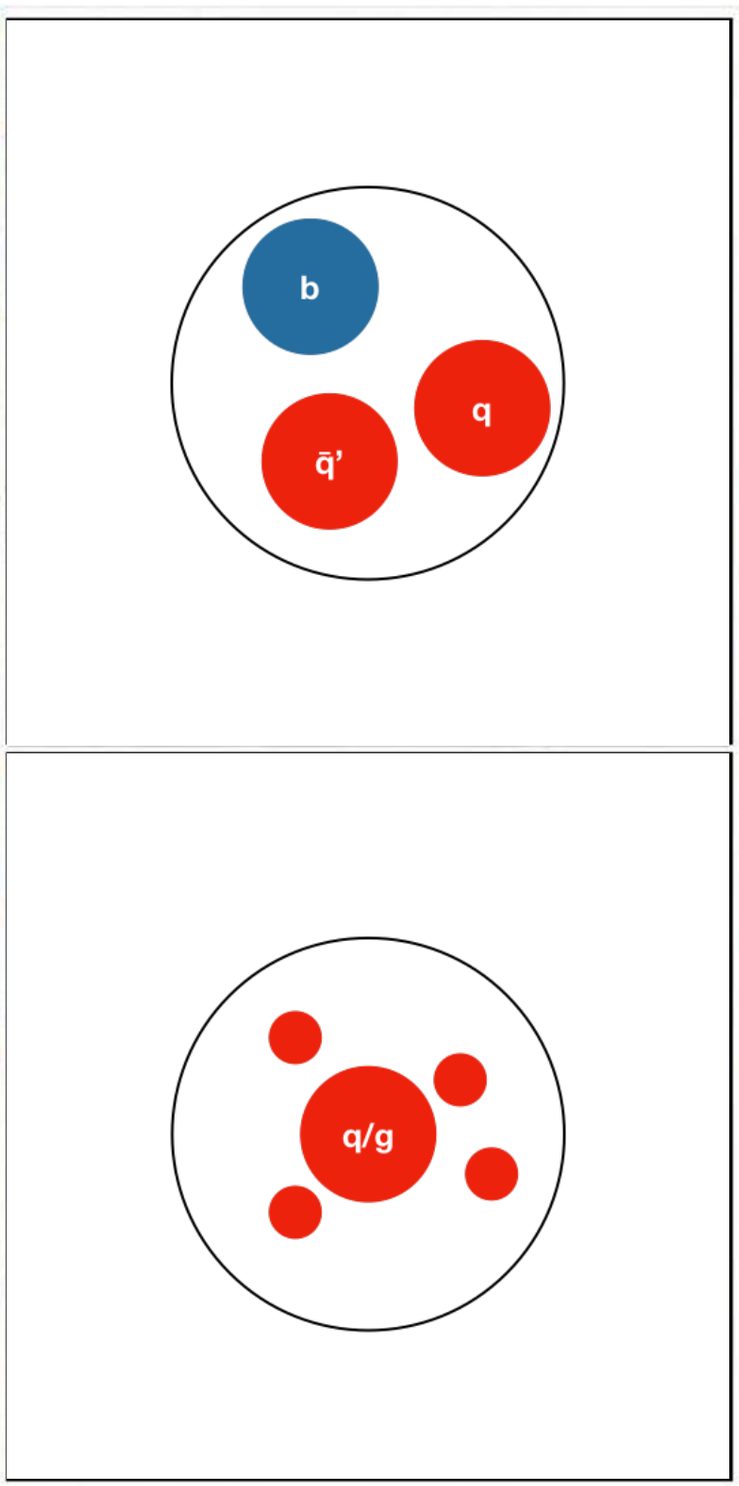

**Substructure**
Distribution in (η,ϕ,E) of calo clusters reflects underlying top quark decay

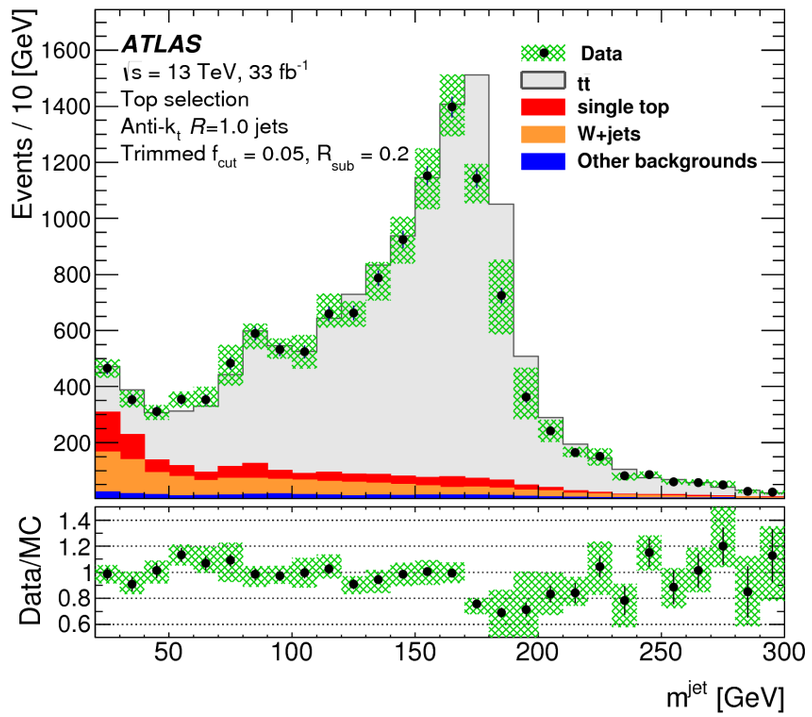
- *N*-subjettiness ratio $\tau_{32}$
- Soft drop mass, $n_{SD}$
- ECF, $C_2^{(\beta)}$, $D_2^{(\beta)}$

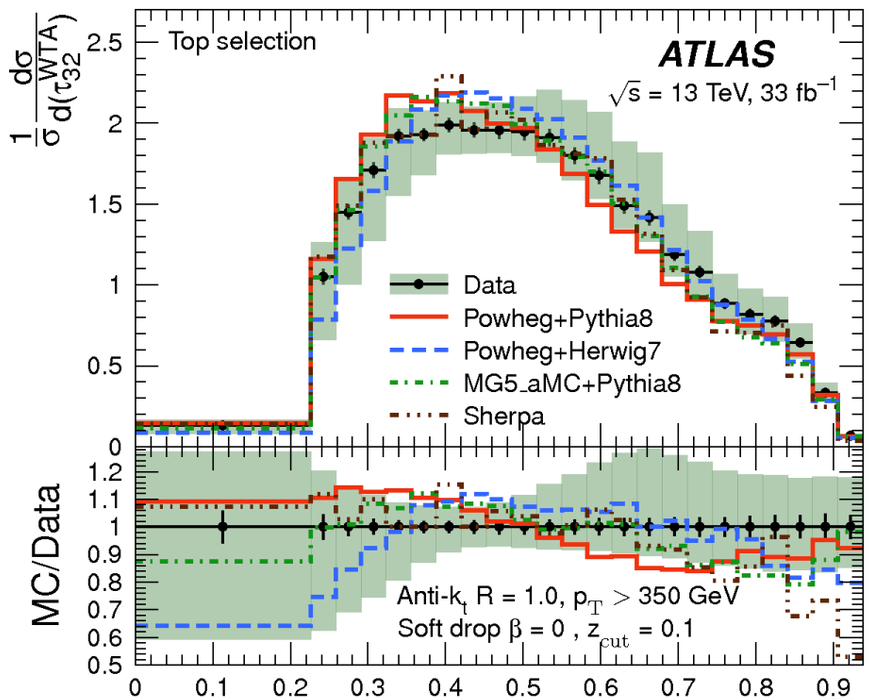
NEW! arXiv: 1903.02942

# Top Tagging in a Nutshell

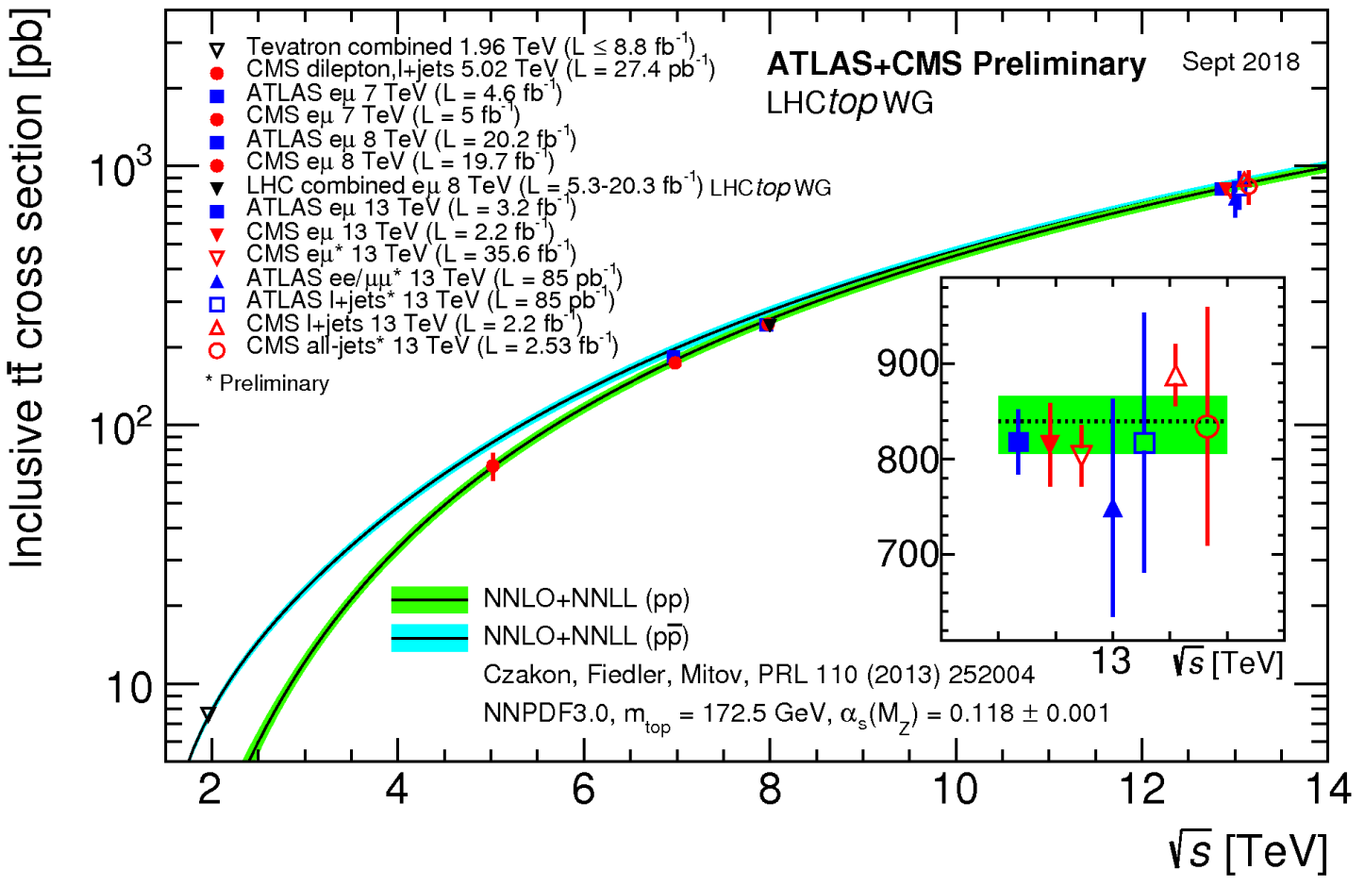
Apply **cut** on **substructure** variable(s) as a function of jet **kinematic** variables ($p_T$, *y*, *m*)

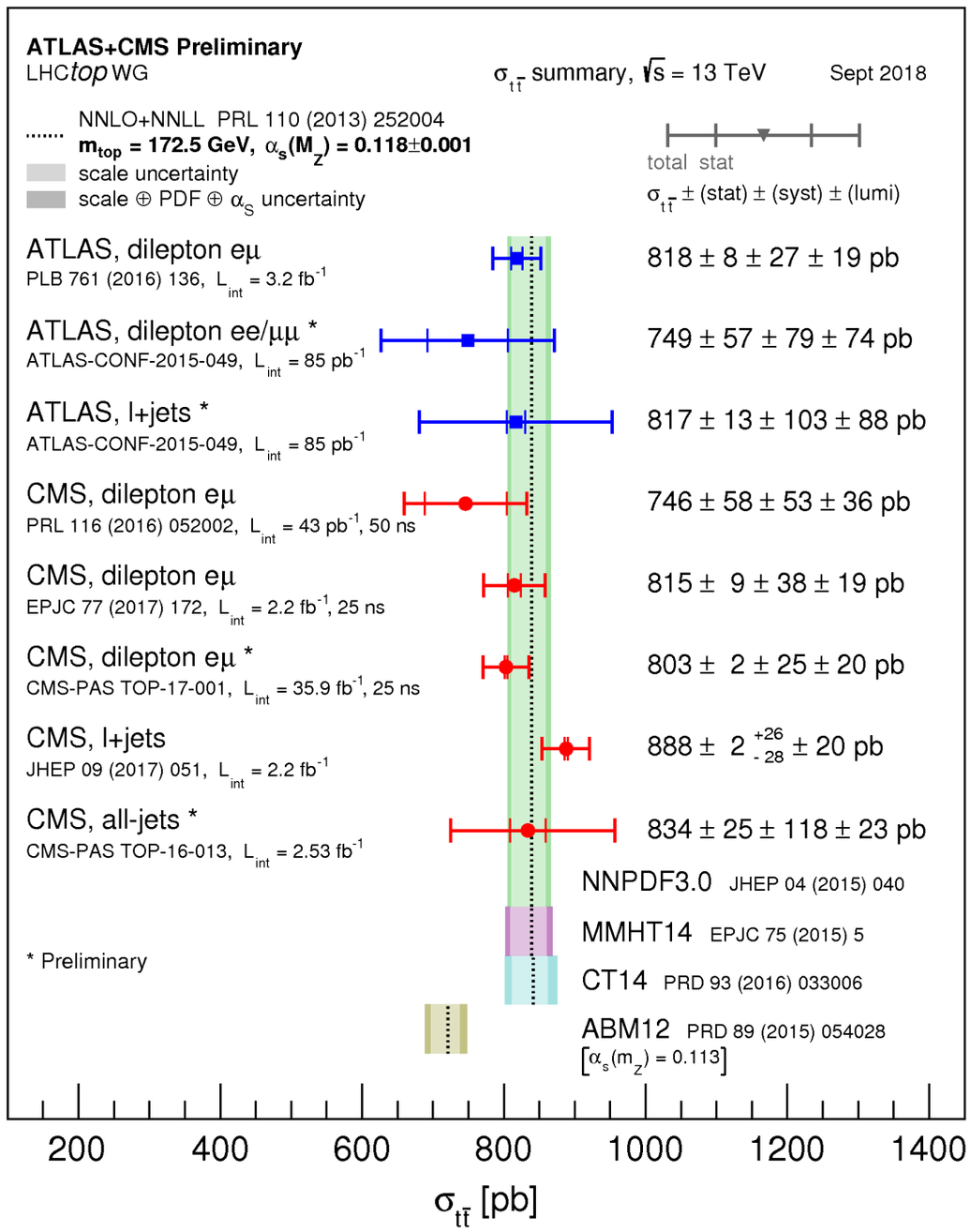



# $t\bar{t}$ total xs (QCD)




**Inclusive cross-section in very good agreement with NNLO+NNLL calculations**

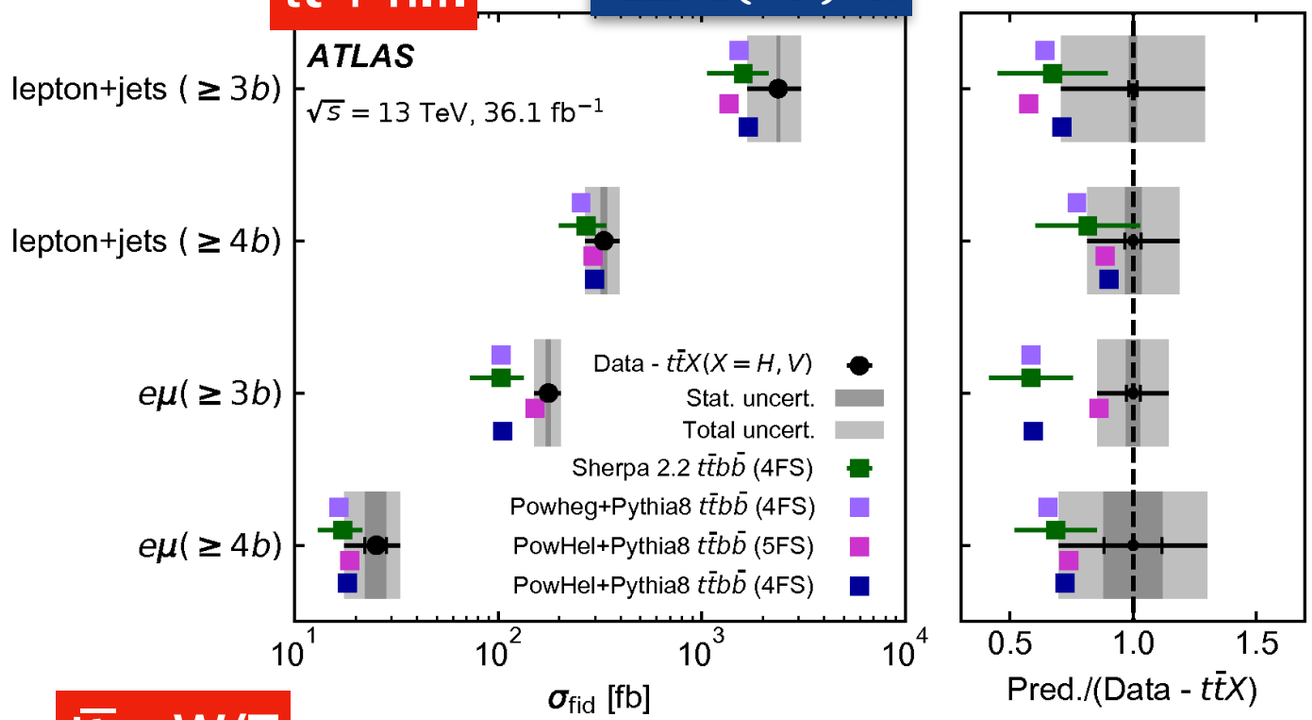
**$\Delta\sigma(\text{exp}) \lesssim \Delta\sigma(\text{th})$**

Possible deviations still allowed:

- small corners of the phase-space
- differential cross-sections
- associate production

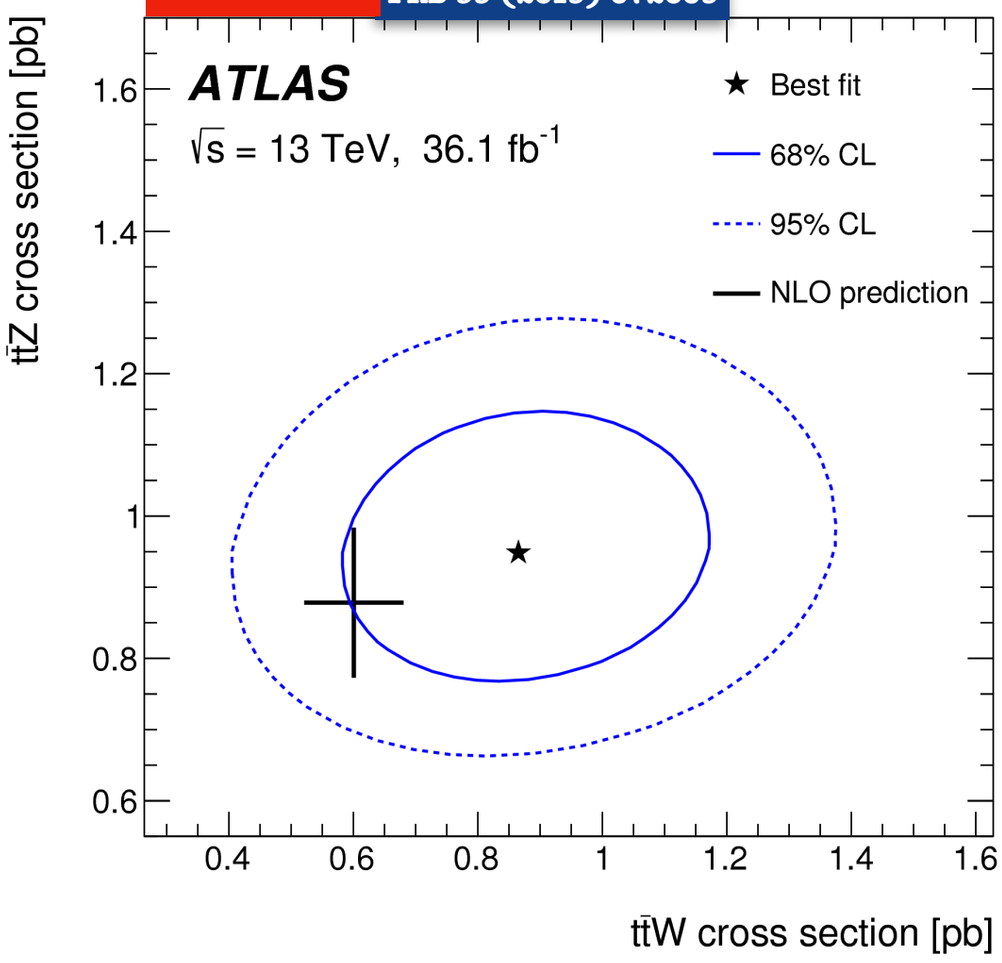
## $t\bar{t}$ + h.f.

JHEP 04 (2019) 046



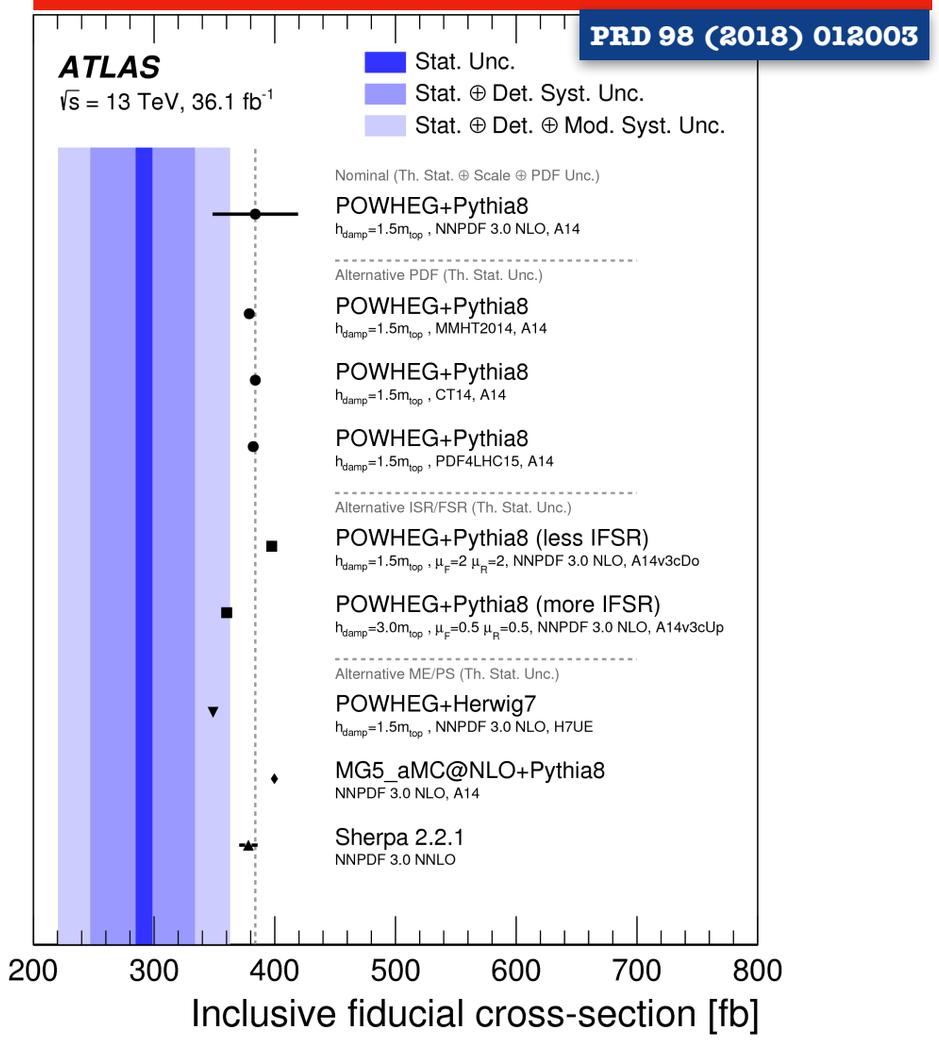

## $t\bar{t}$ + W/Z

PRD 99 (2019) 072009



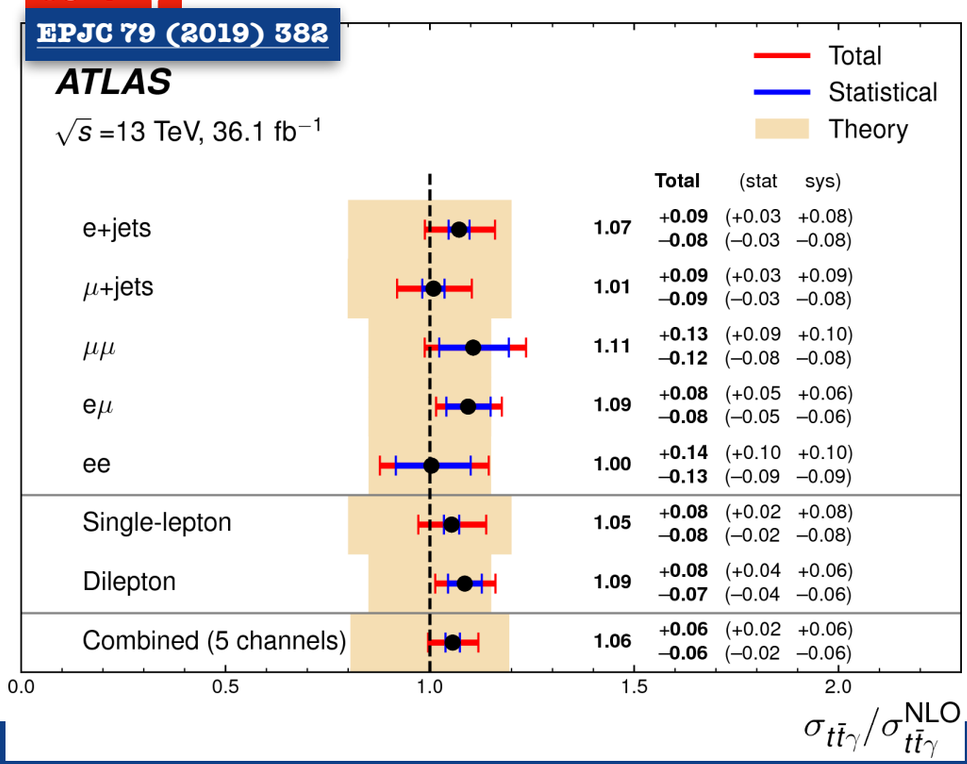

## All-hadronic ($p_{T,1}$>500 GeV, $p_{T,2}$>350 GeV)

PRD 98 (2018) 012003

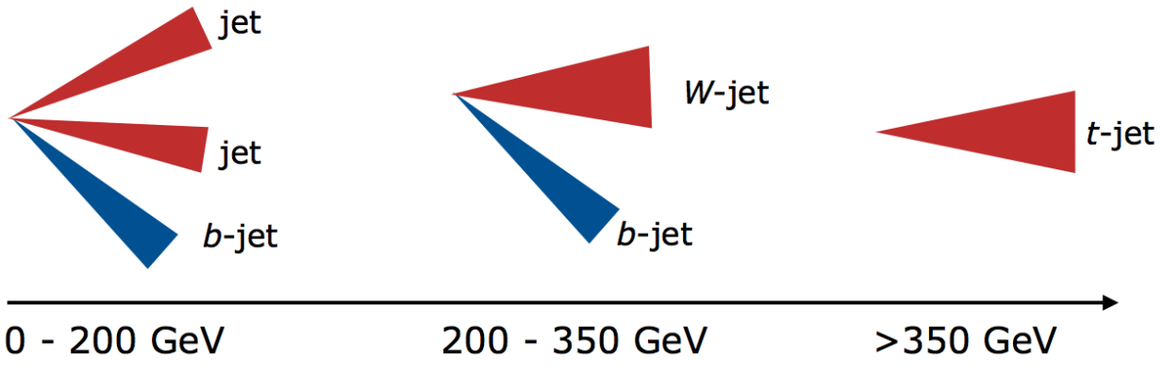



## $t\bar{t}$ + γ

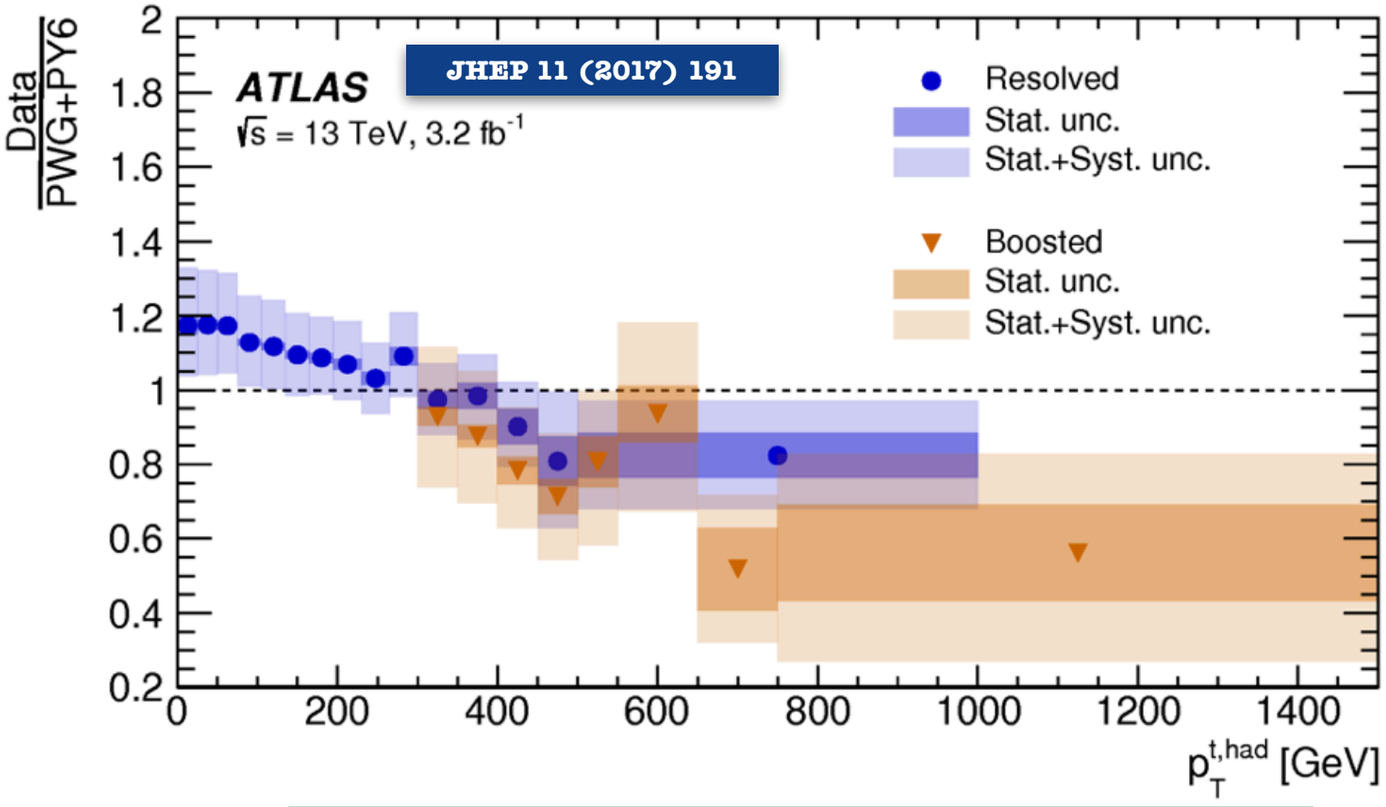
EPJC 79 (2019) 382

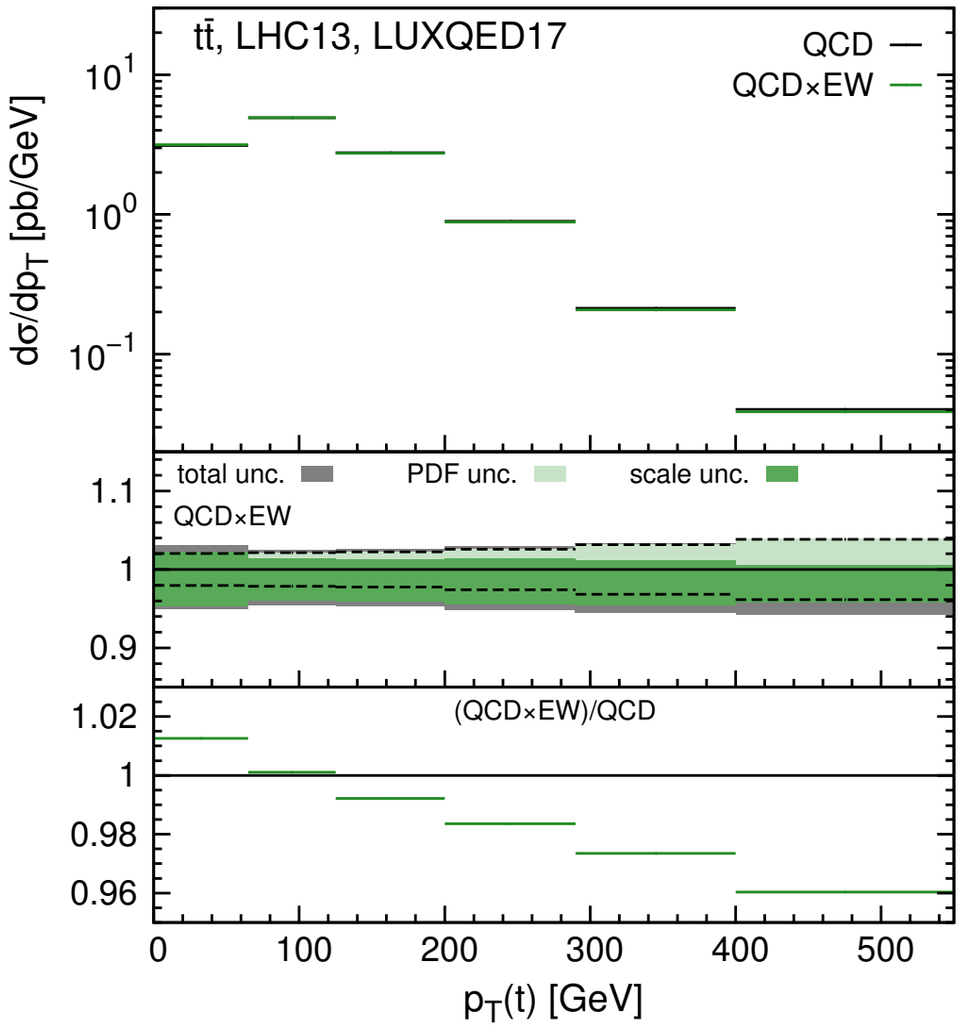


# Top Transverse Momentum



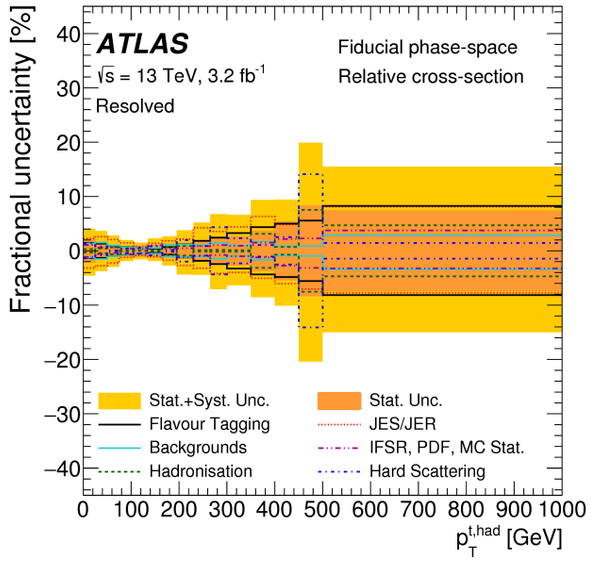

- **Most important** observable?
- Different **kinematic** regimes and **reconstruction** techniques [0, ~1 TeV]
- Sensitive to **final state radiation**,
- Very precise low-$p_T$ differential cross-sections indicate **disagreement** with increasing $p_T$




Resolved and boosted channel “overlap”
Indications that NNLO QCD + NLO EW corrections are important!

# Uncertainties: Top quark $p_T$



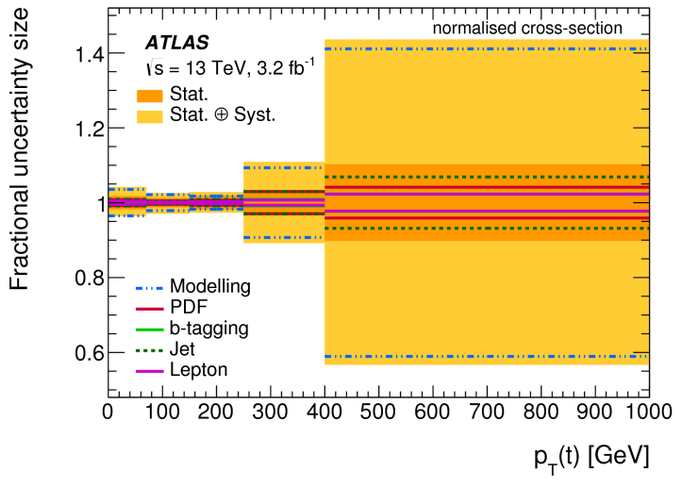

**Single lepton**

Jet energy scale 5%

b-tagging < 5%

Background modelling (low pT) 2%

→ Signal modelling (high pT) 5%

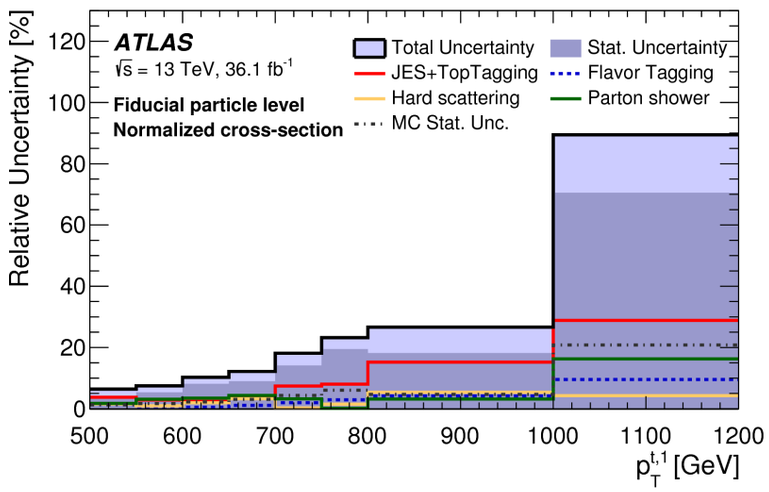



**Dilepton**

→ Signal modelling >10%

PDF 5%

b-tagging < 5%




**All hadronic**

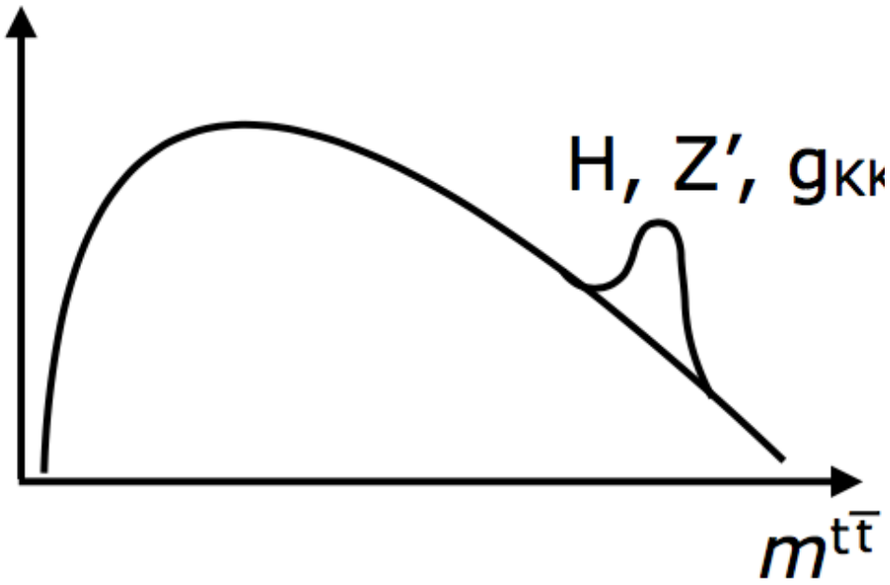
Jet energy scale 5%

Top-tagging 10%

b-tagging < 10%

→ Signal modelling (ps/had) 15%

# $t\bar{t}$ invariant mass




All-hadronic
Boosted

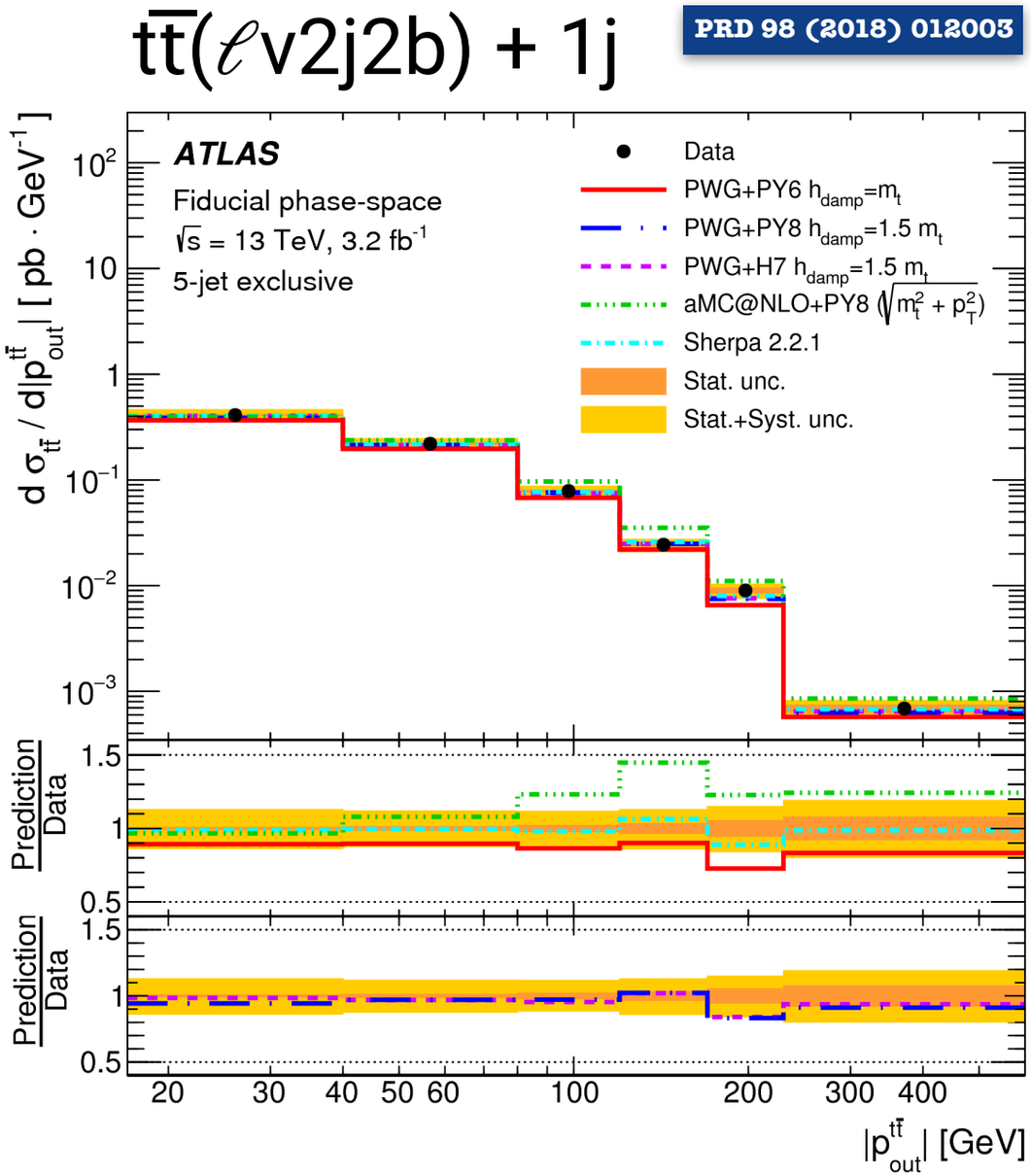


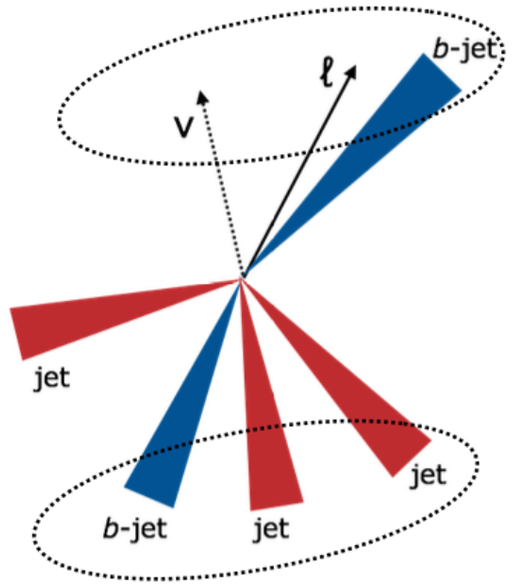

PRD 98 (2018) 012003



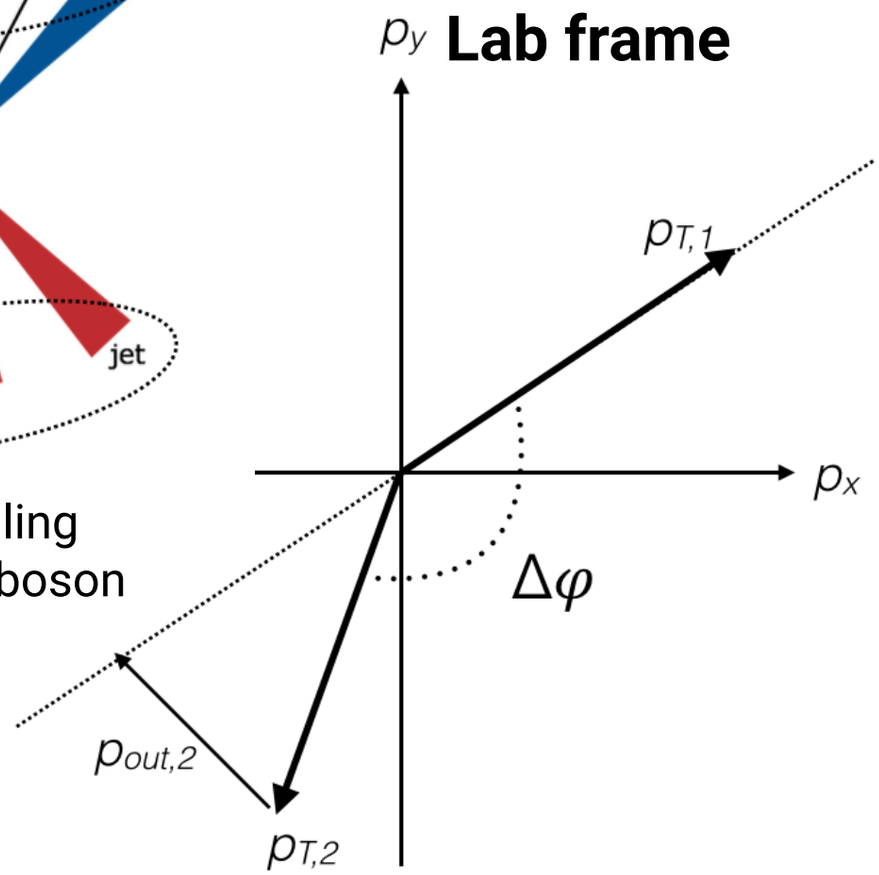

- Generally **well modelled**, no obvious peaks hinting at BSM particles
- All-Hadronic boosted best resolution to this date at mass > 1 TeV

# Extra radiation



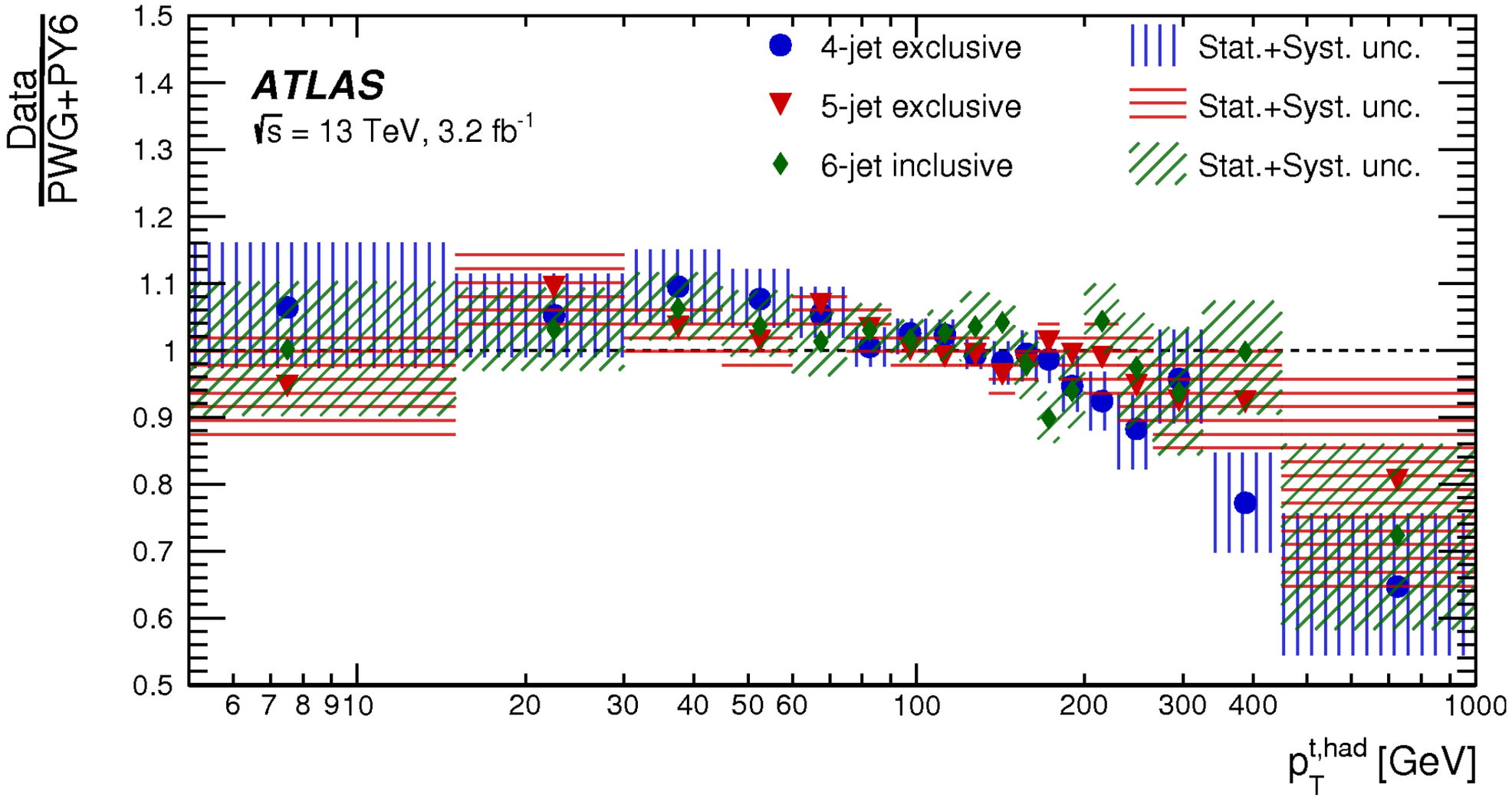




tt̄ system recoiling against extra jet/boson




"out-of-plane" momentum (correlated with $p_T^{tt}$ and $\Delta\varphi^{tt}$)

- Additional radiation (esp ISR) test NLO, NNLO calculations
- Very useful for MC tuning

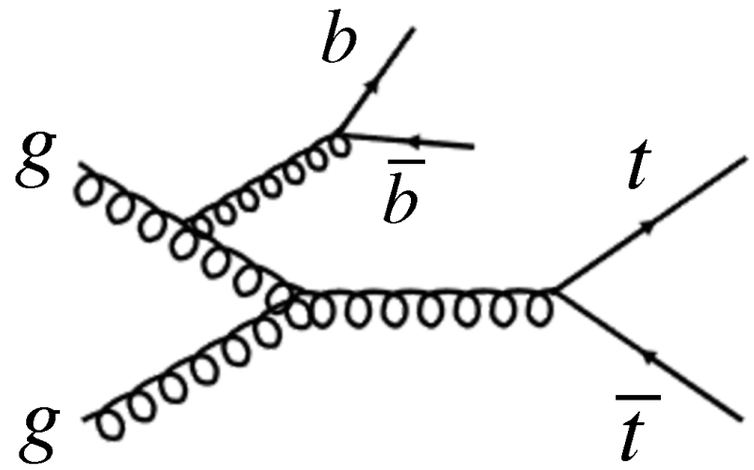


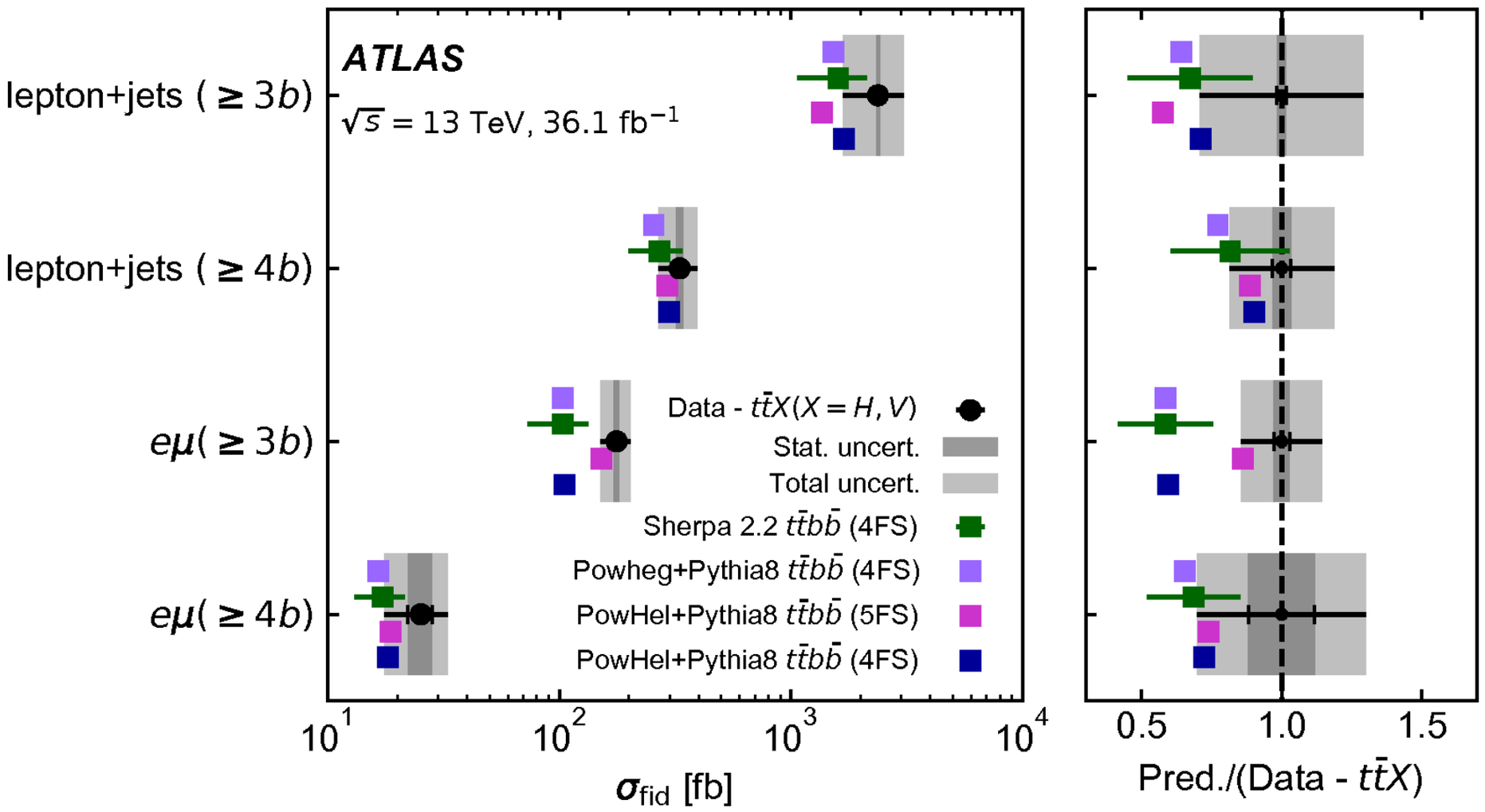

- Poorest data/PP6 disagreement in $t\bar{t}$ ($\ell\nu$2j2b)+ 0j
- Improved agreement with more additional jets

# Extra radiation (HF)

JHEP 04 (2019) 046

- Associated emission of $t\bar{t}$ + $b\bar{b}$ heavy flavour complicated process!
- Crucial background to tt+Higgs



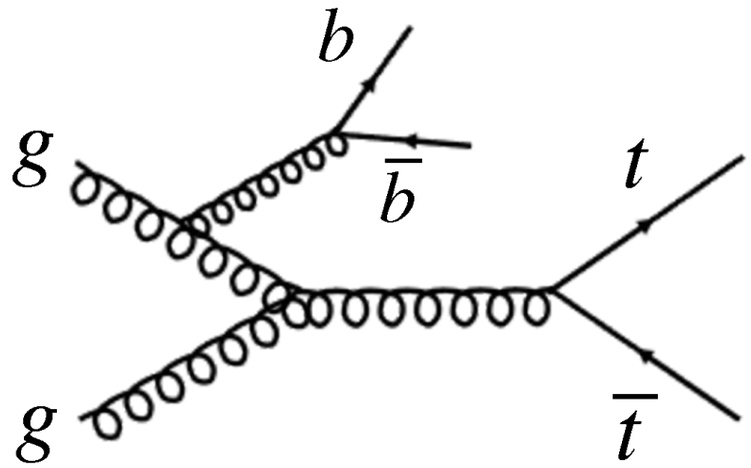

**Predictions lower than observed**

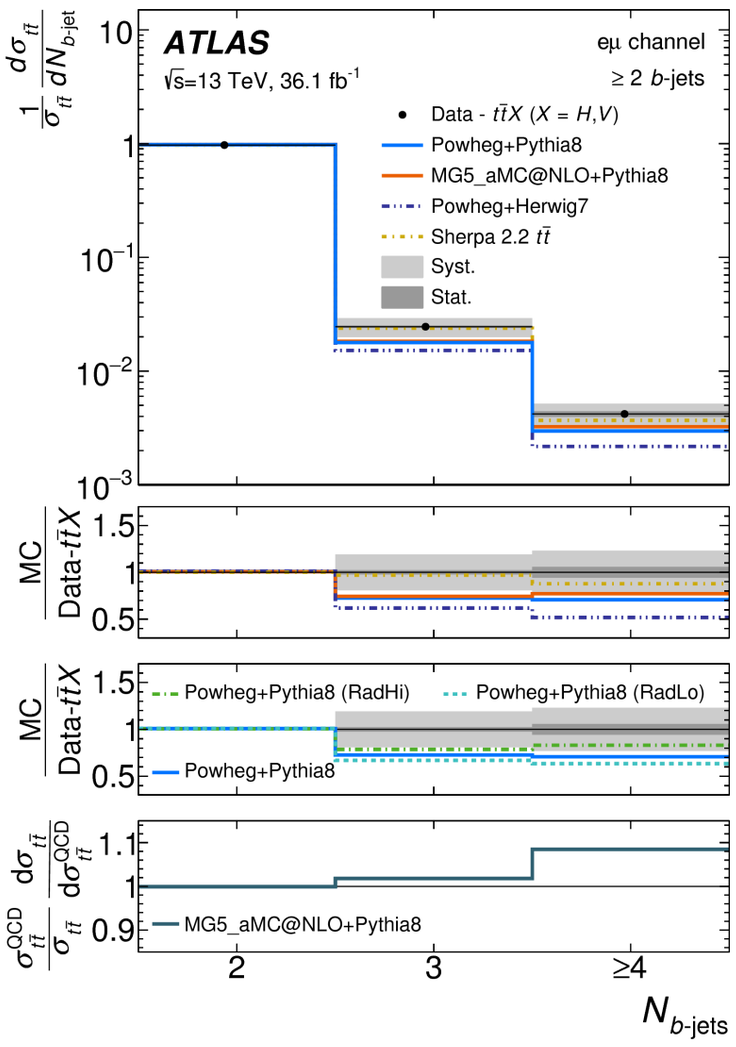
**5FS better?**

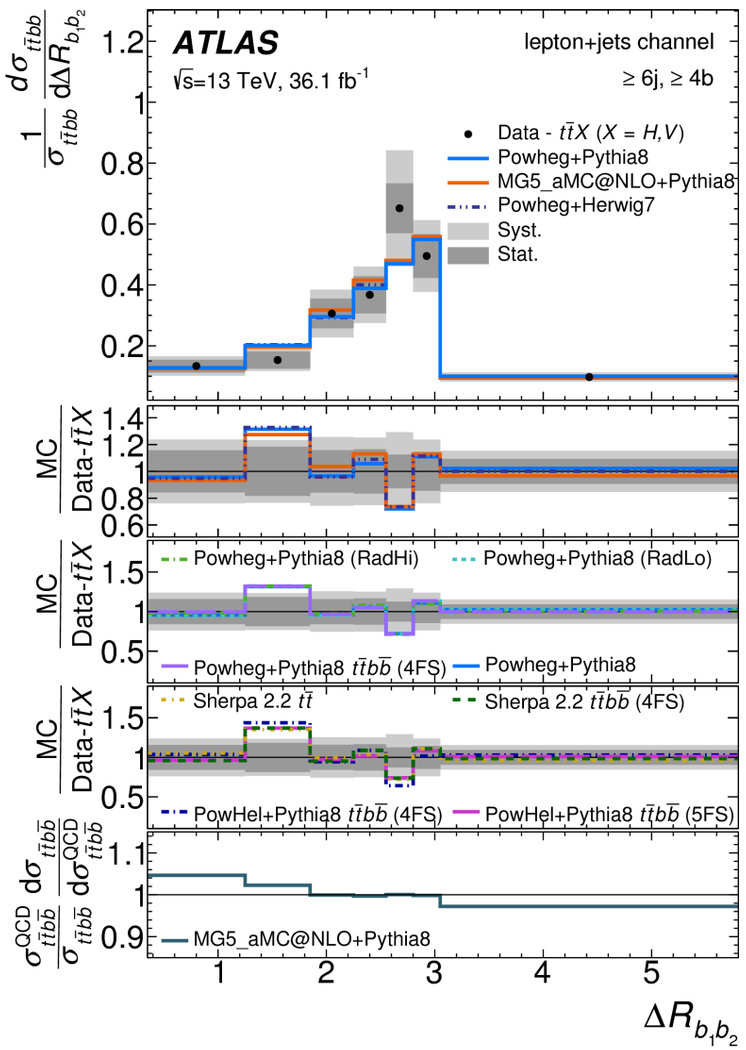
# Extra radiation (HF)

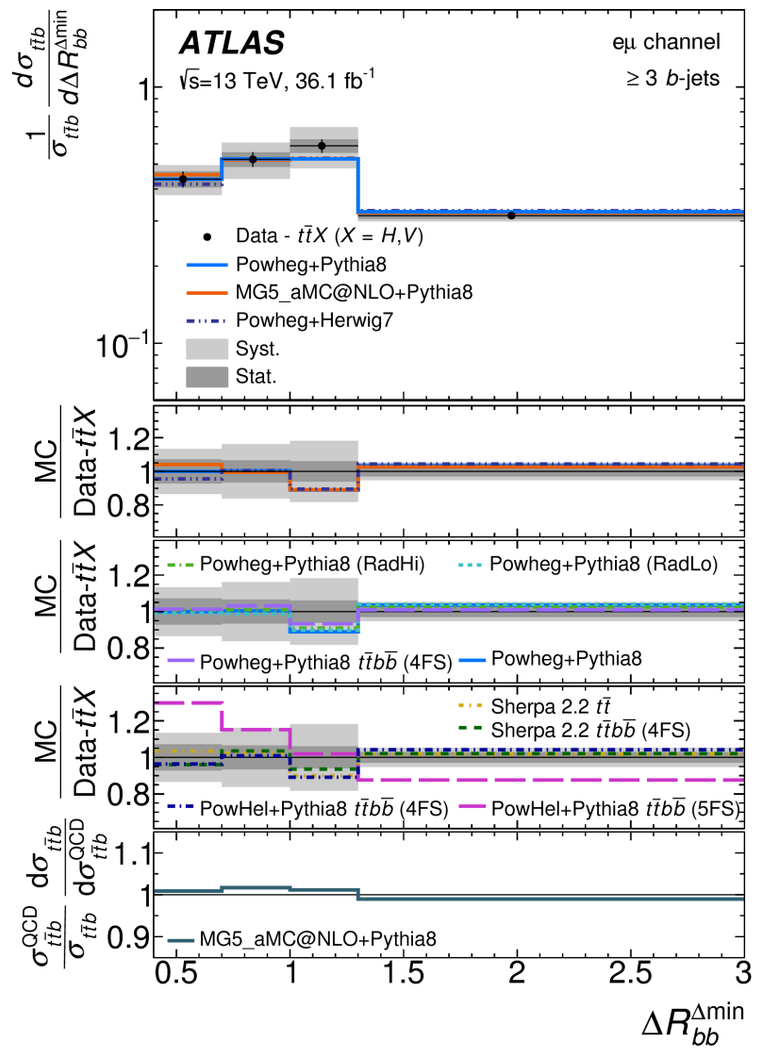
JHEP 04 (2019) 046

- Associated emission of $t\bar{t}$ + $b\bar{b}$ heavy flavour complicated process!
- Crucial background to tt+Higgs



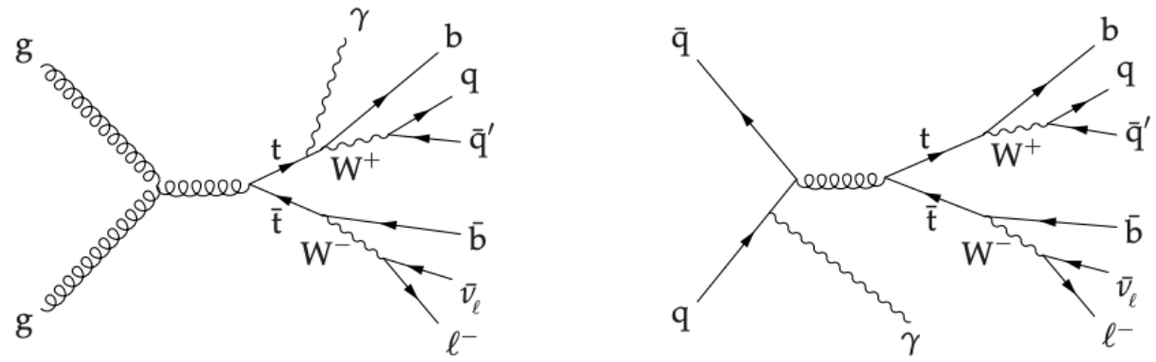



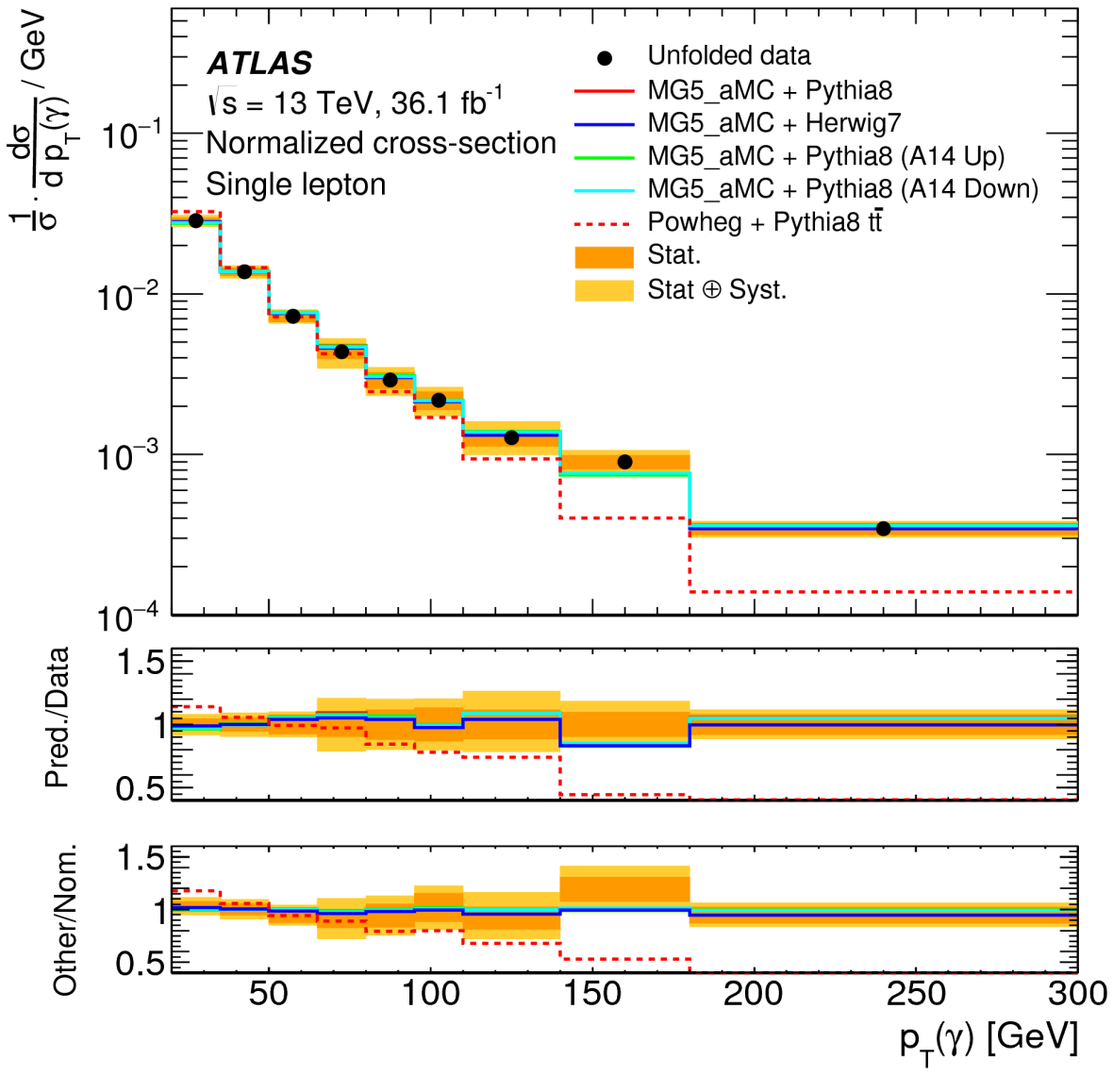



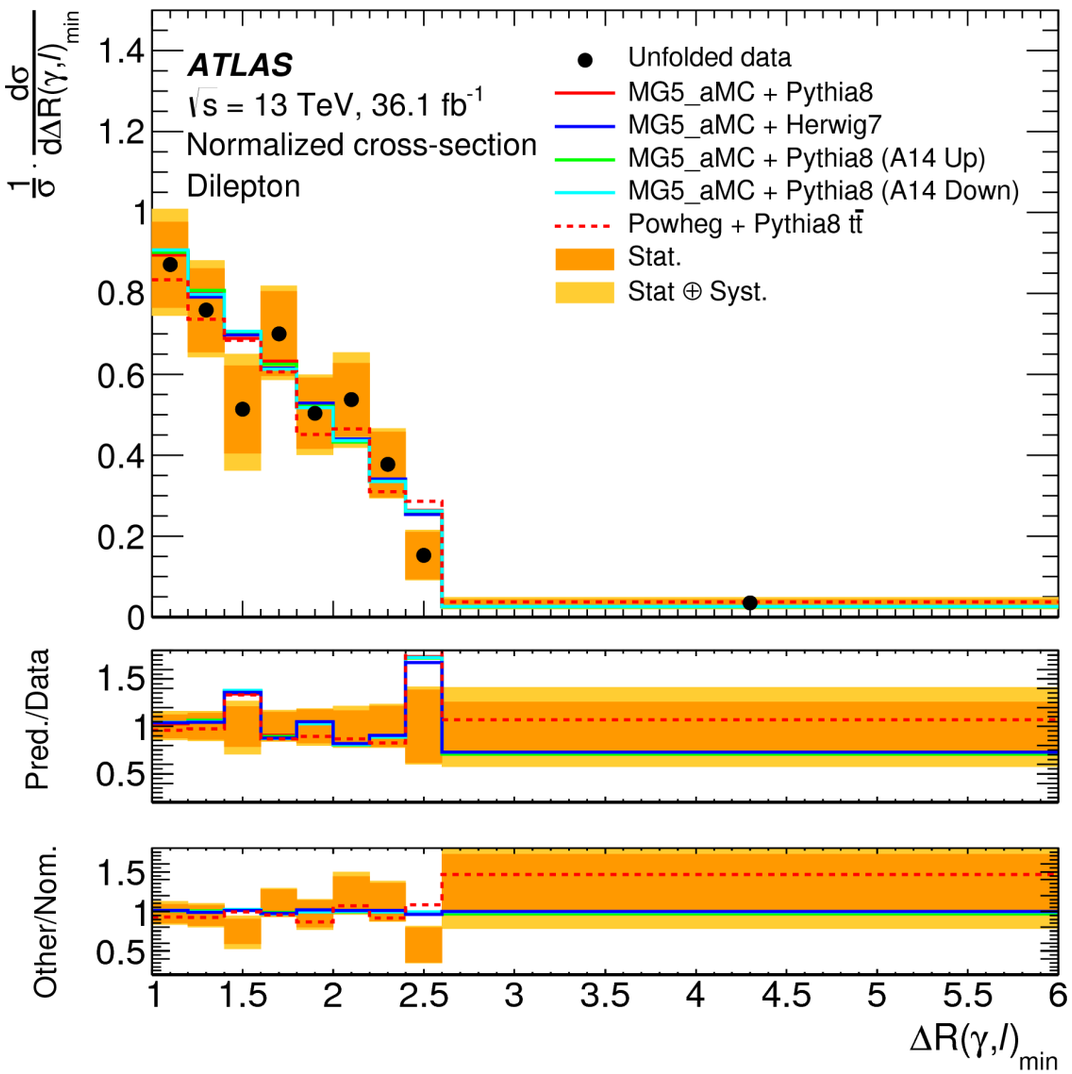
# Extra radiation (γ)

EPJC 79 (2019) 382

- Top quarks have EM charge, emit light!
- But also quarks in the initial state…
- Probes compositeness: t* →tγ

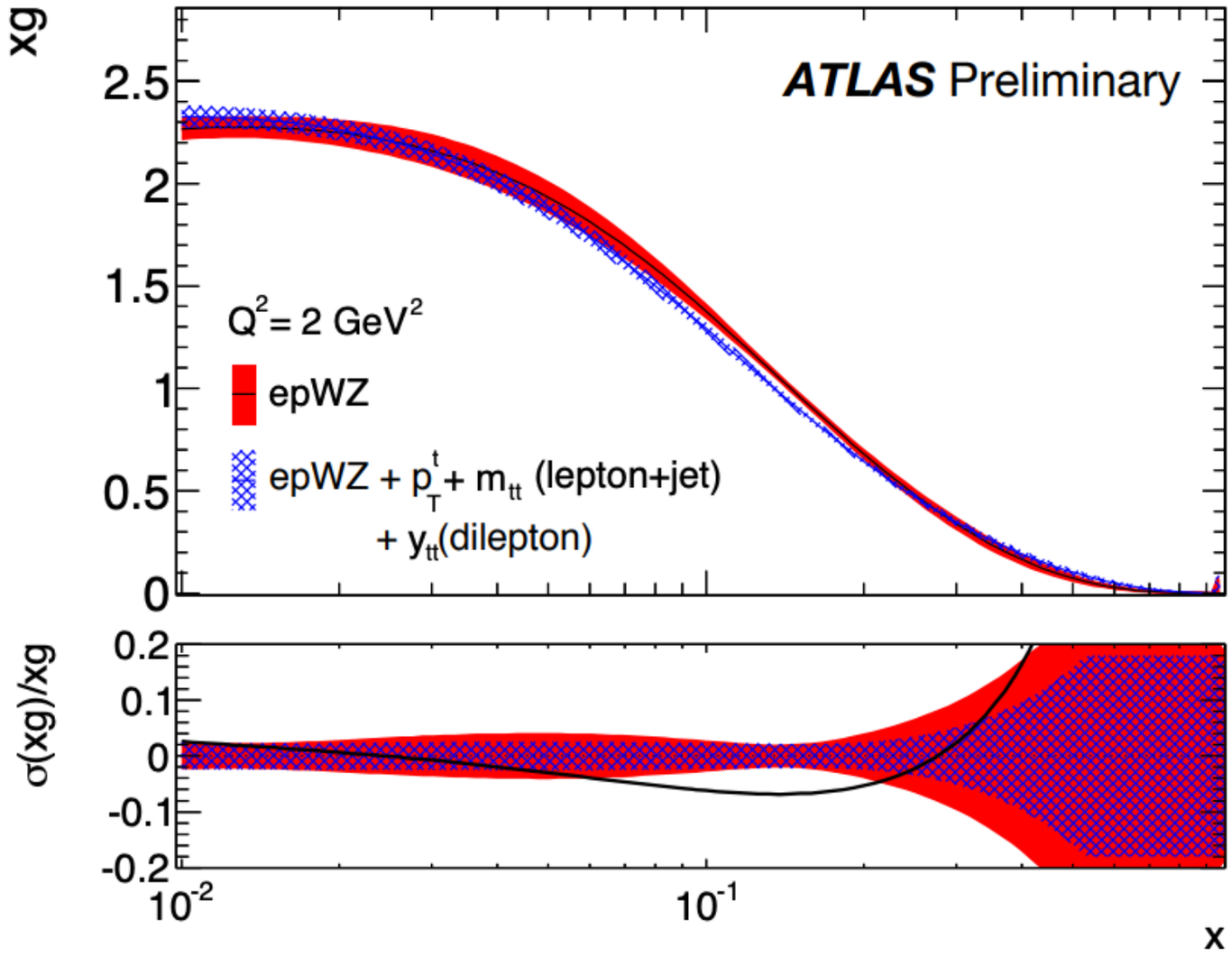


# PDF Fit

- **ATLASepWZtop18**: NNLO pQCD fit using ATLAS differential cross-sections at 7 TeV (W, Z/γ*) and 8 TeV ($t\bar{t}$ $p_T$, $m_{tt}$ single lepton, $y_{tt}$ dilepton) + HERA $e^{\pm}p$ data
- Good fit to data when $p_T^t$ and $m_{tt}$ used separately, pull opposite ways >> decorrelation, effect due to **IFSR** modelling systematic. No significant impact on the shape of gluon PDF
- Impact of top diffxs: harder PDF, reduced high-x gluon uncertainty

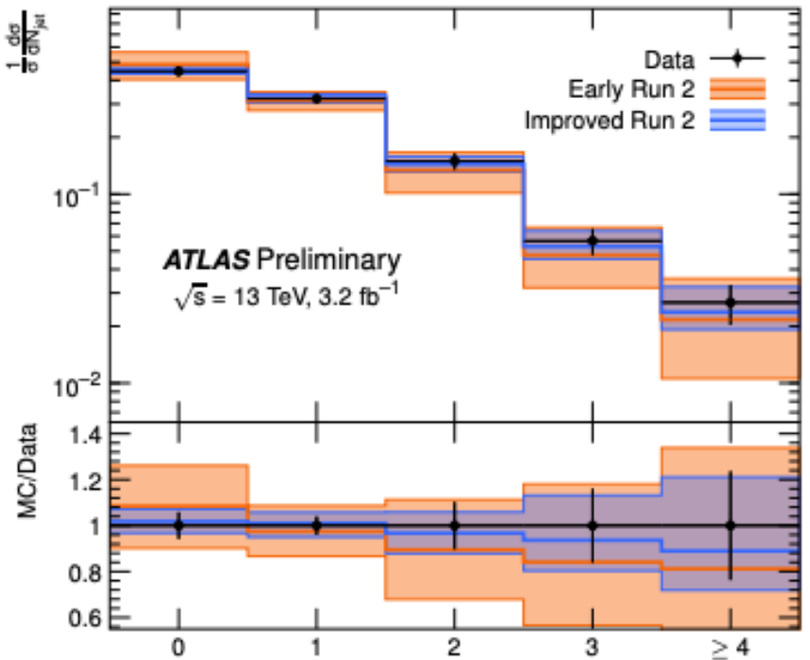


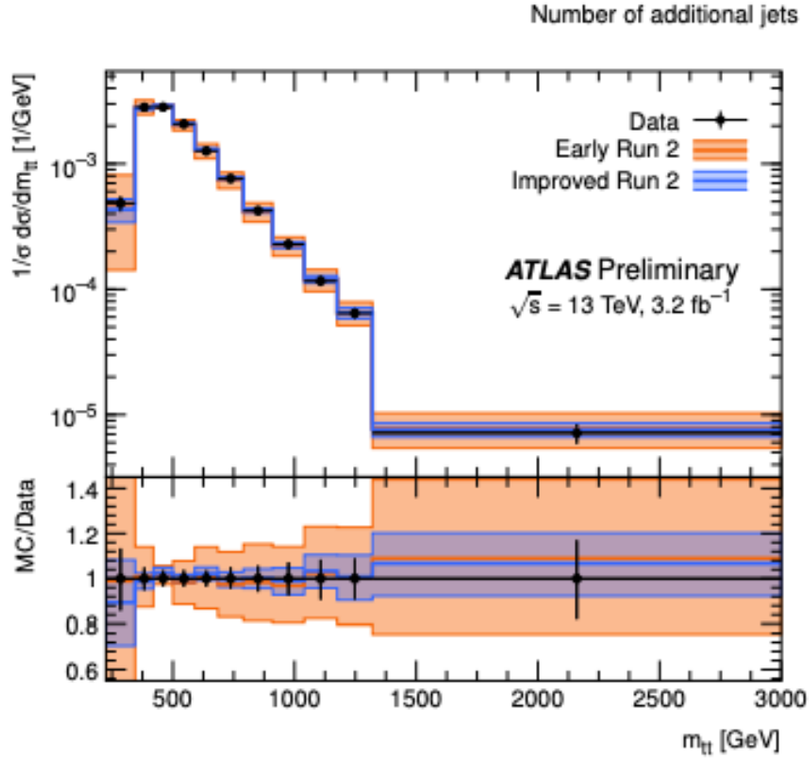
# MC Modeling

- **Early Run2 measurements**:
  Setup derived from extrapolation of 8 TeV diffxs.
  PWG+P6 workhorse, MC@NLO and H++
  systematics, IFSR P2012

- **Baseline Run2 measurements:**
  Iterative process, make use of early Run2 results
  PWG+Pythia8 nominal, MG5_aMC@NLO and
  Herwig7 systematics, IFSR A14 tune

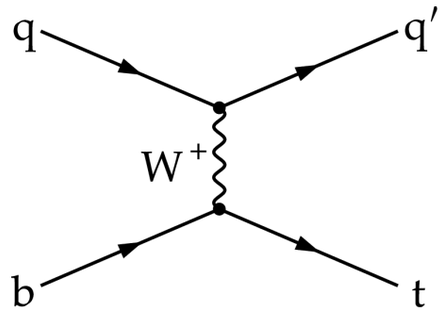
- Clear reduction of systematic uncertainties



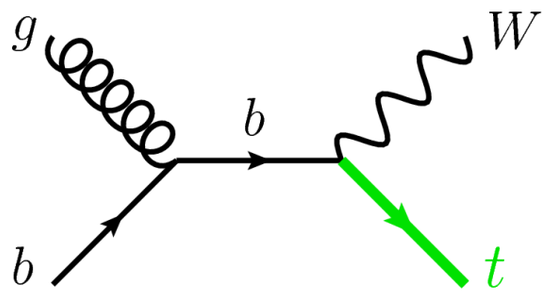



arXiv:1902.07158

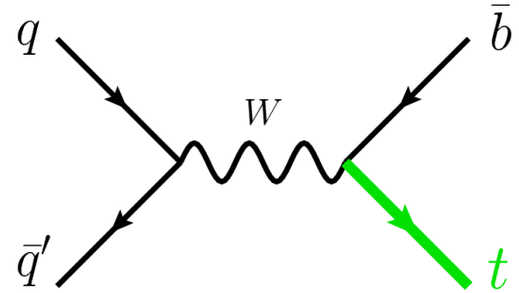
# Single top (EWK)



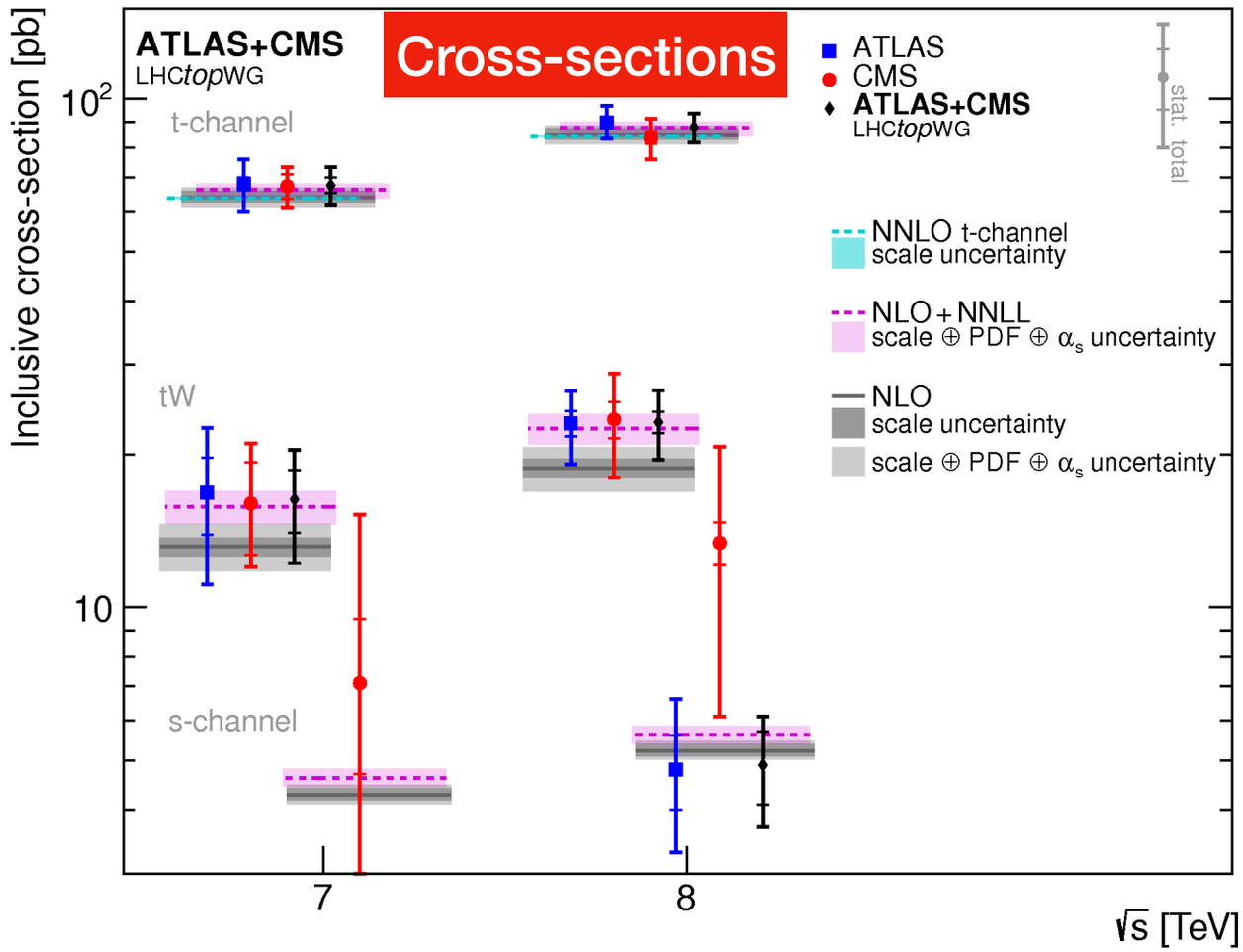

*t*-channel
Most abundant,
Constrains PDF

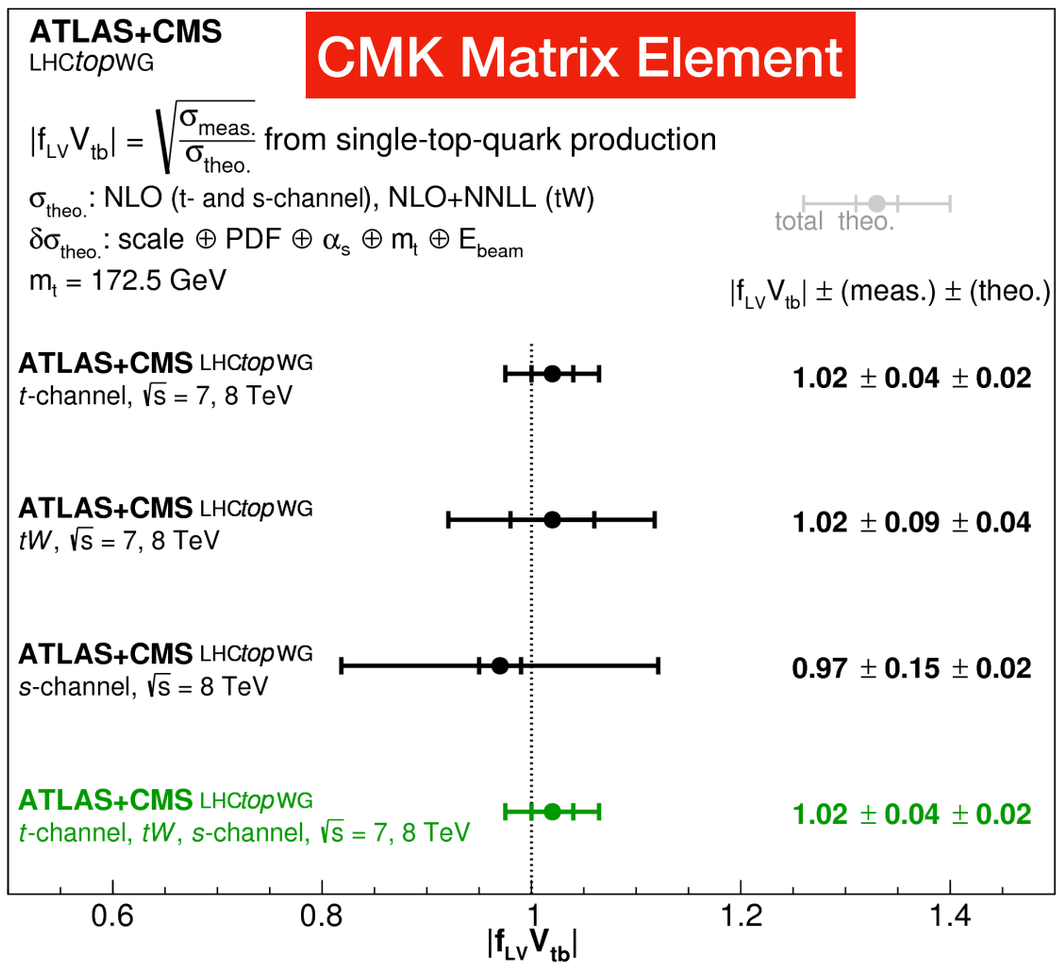



*tW*-channel
Interference with $t\bar{t}$



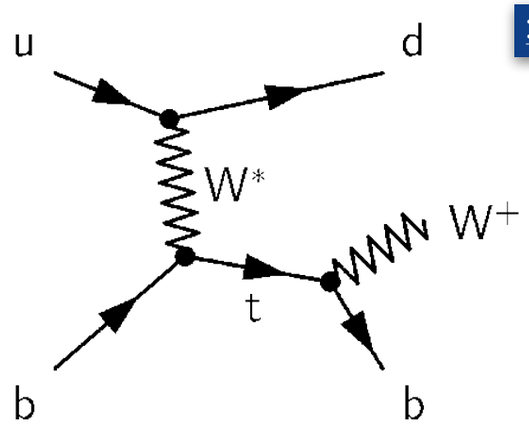

*s*-channel
Small cross-section,
BSM resonances?



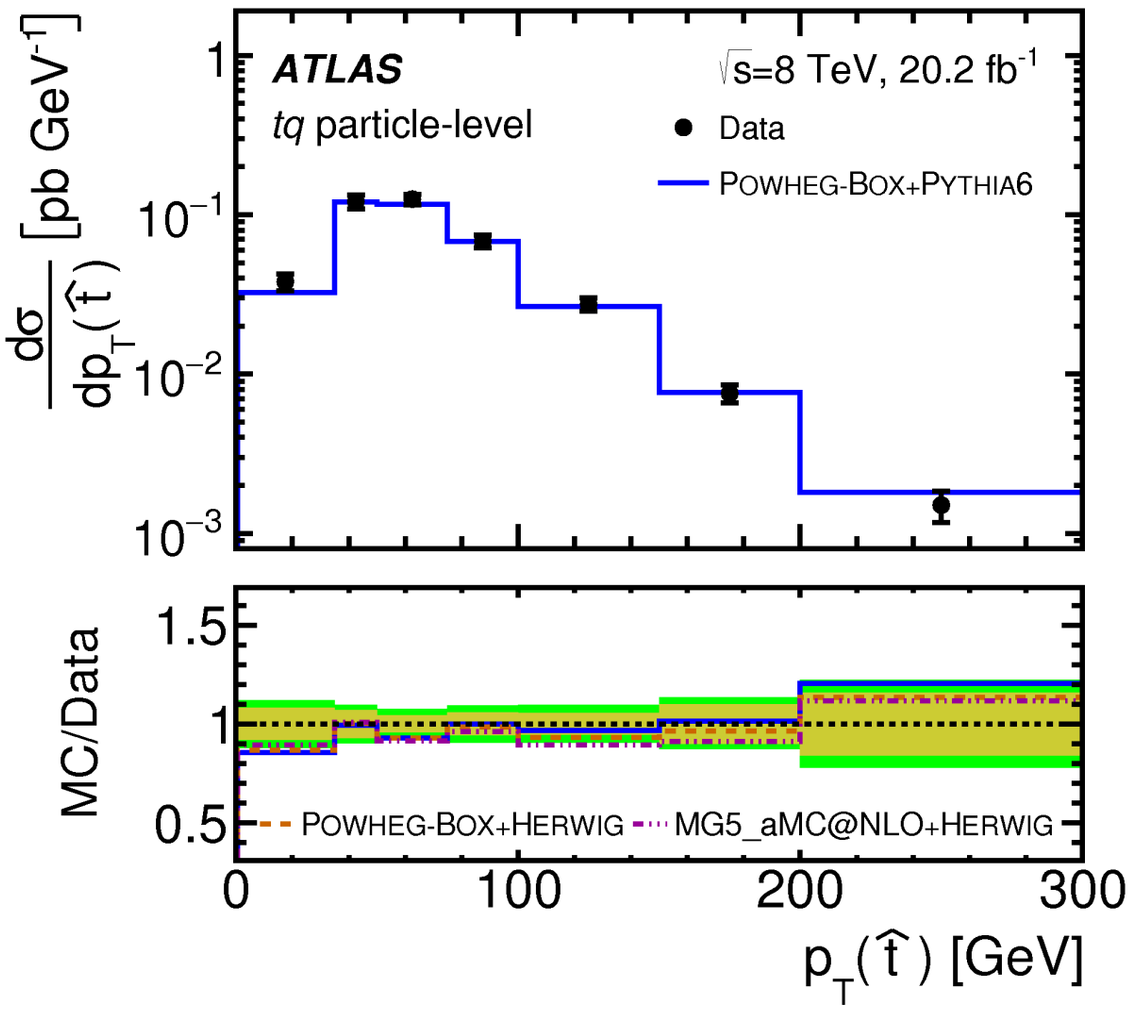



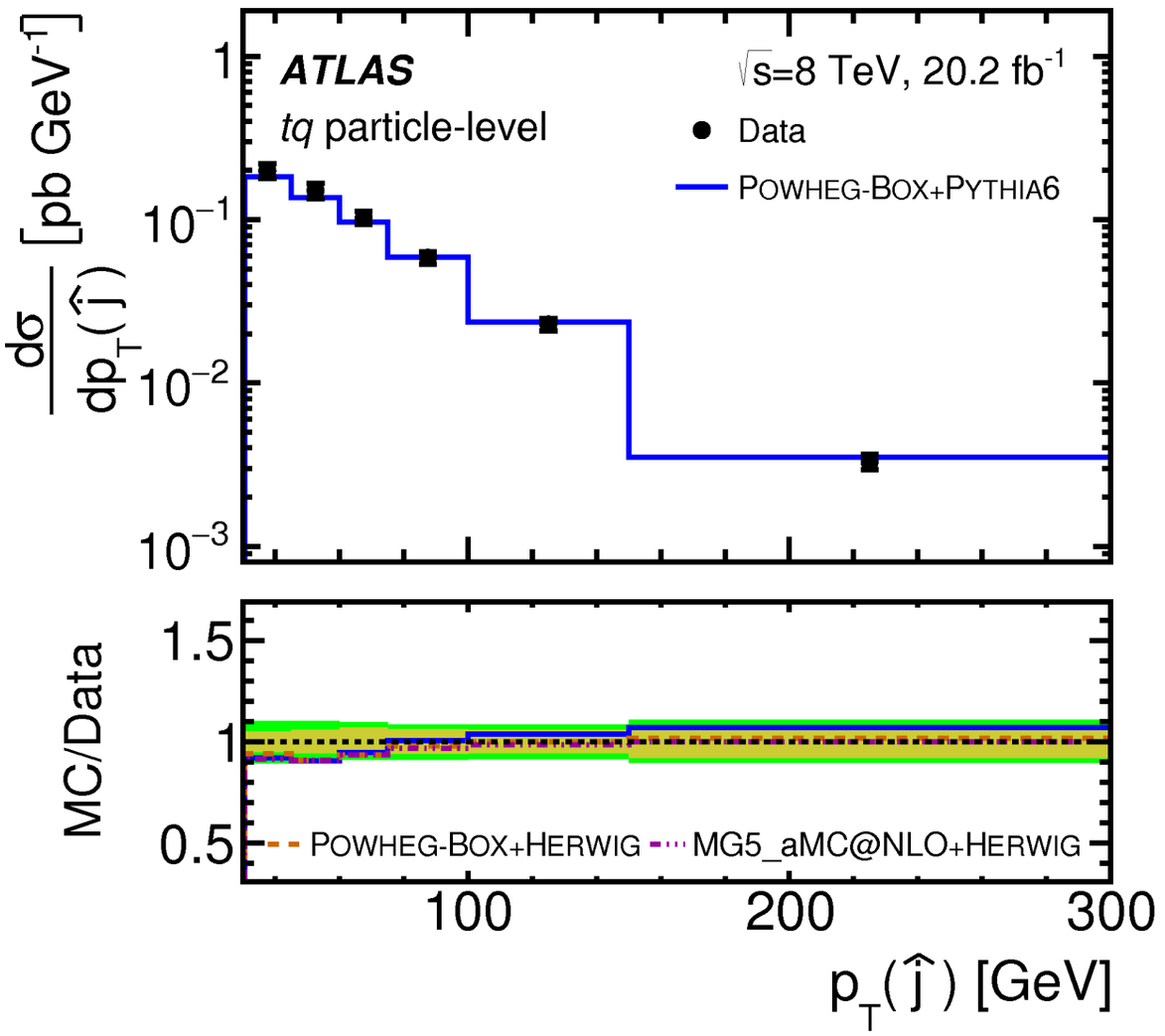
Eur. Phys. J. C 77 (2017) 531

# t-channel



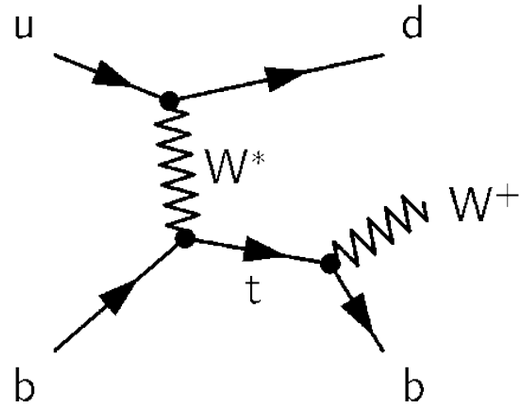

- Is there a mismodeling (slope) here, too?
- Synergies with $t\bar{t}$?



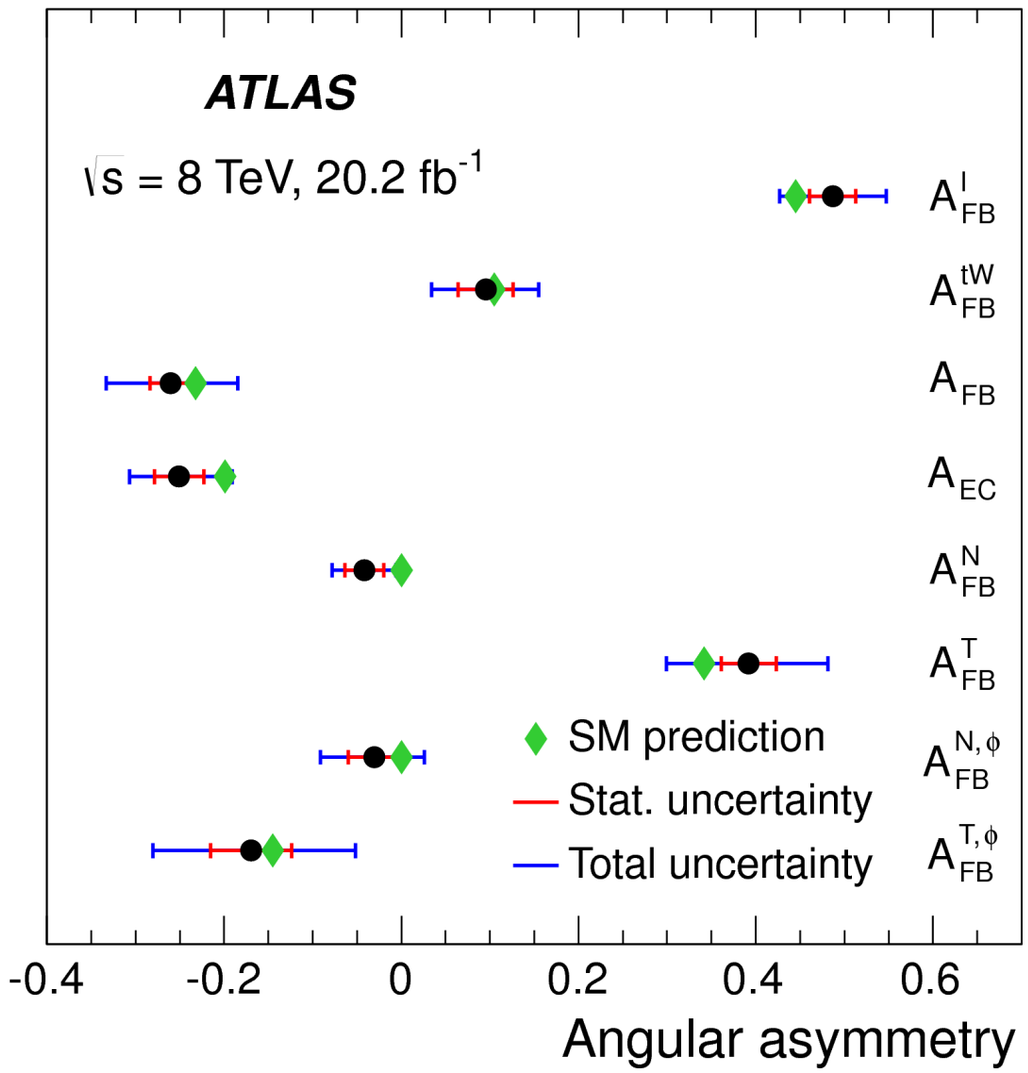



JHEP 04 (2017) 124

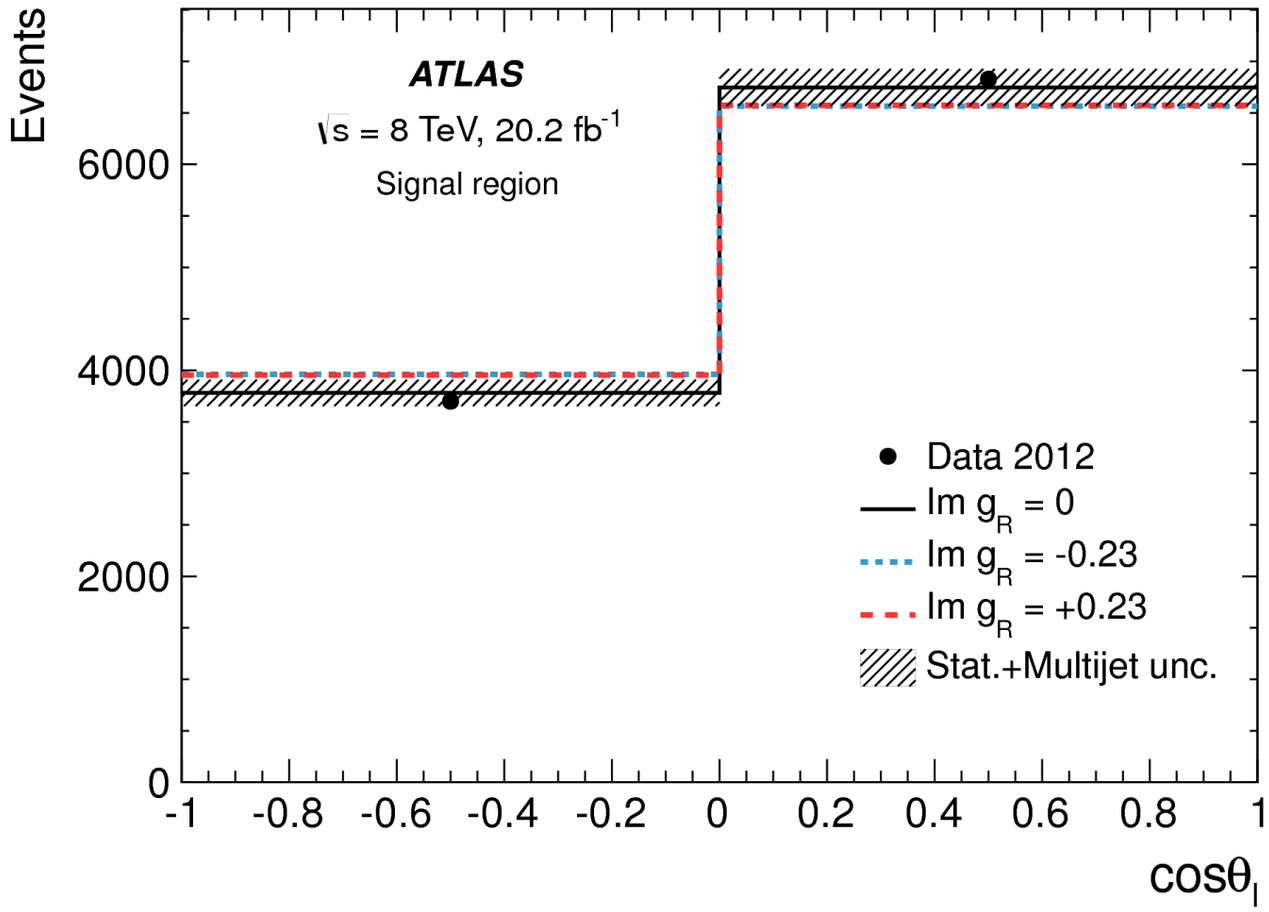
# t-channel




Polarization observables extracted from angular asymmetries

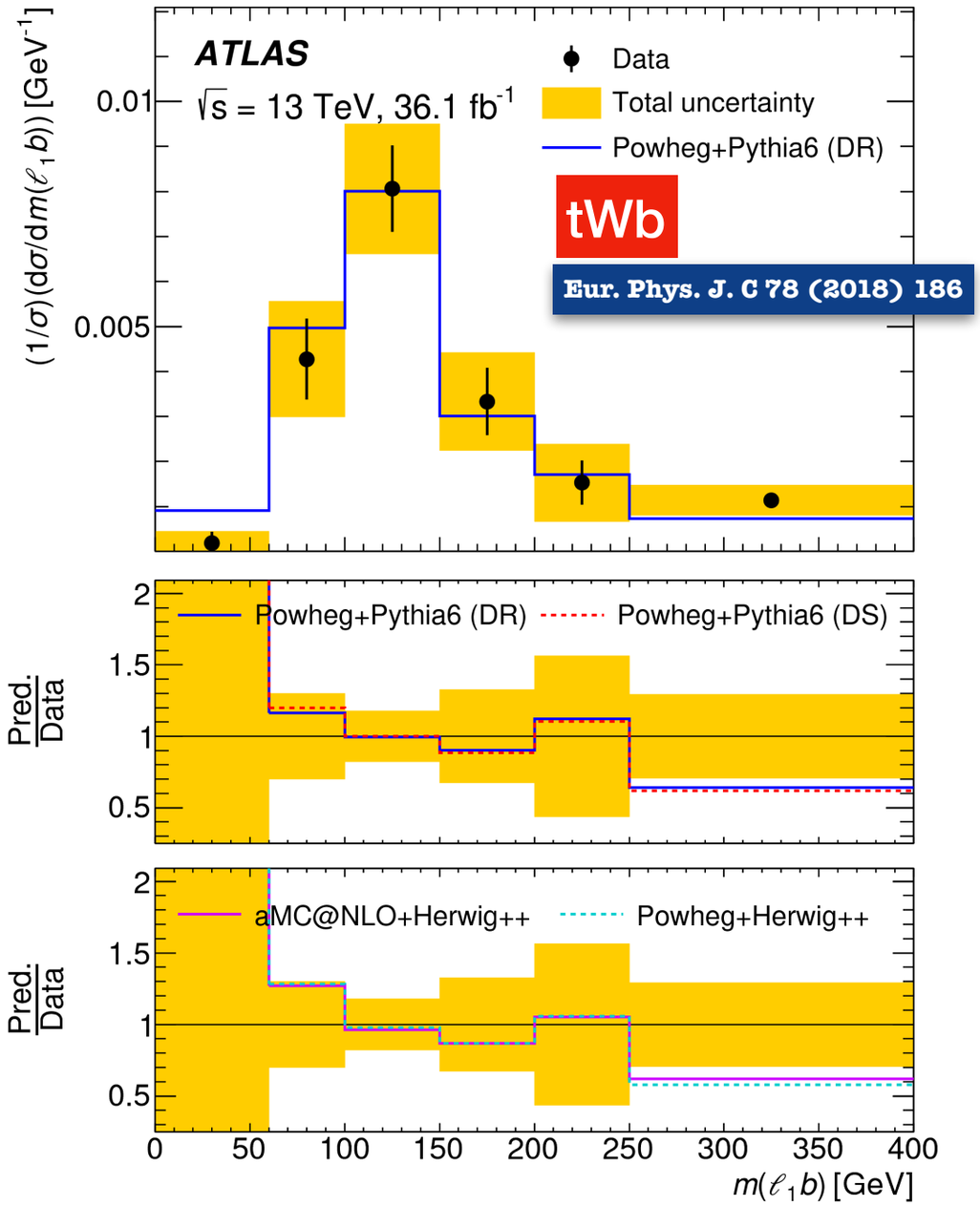


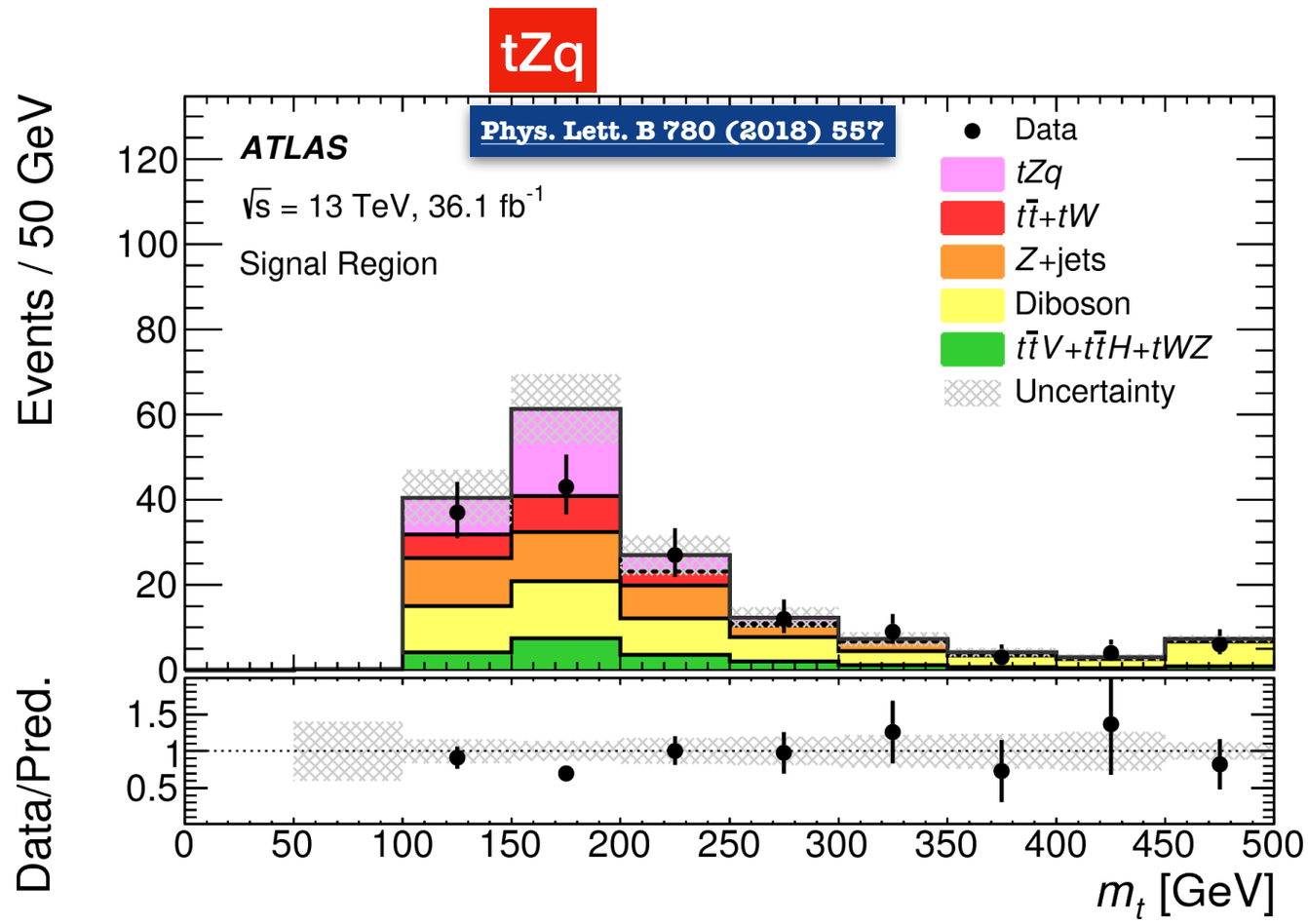

Set limits on anomalous couplings



# Single top + W/Z

**Associate production with boson established**
***tW* differential cross-sections**
**tZq @ 4.2σ evidence (CMS >5σ, 77 fb$^{-1}$)**

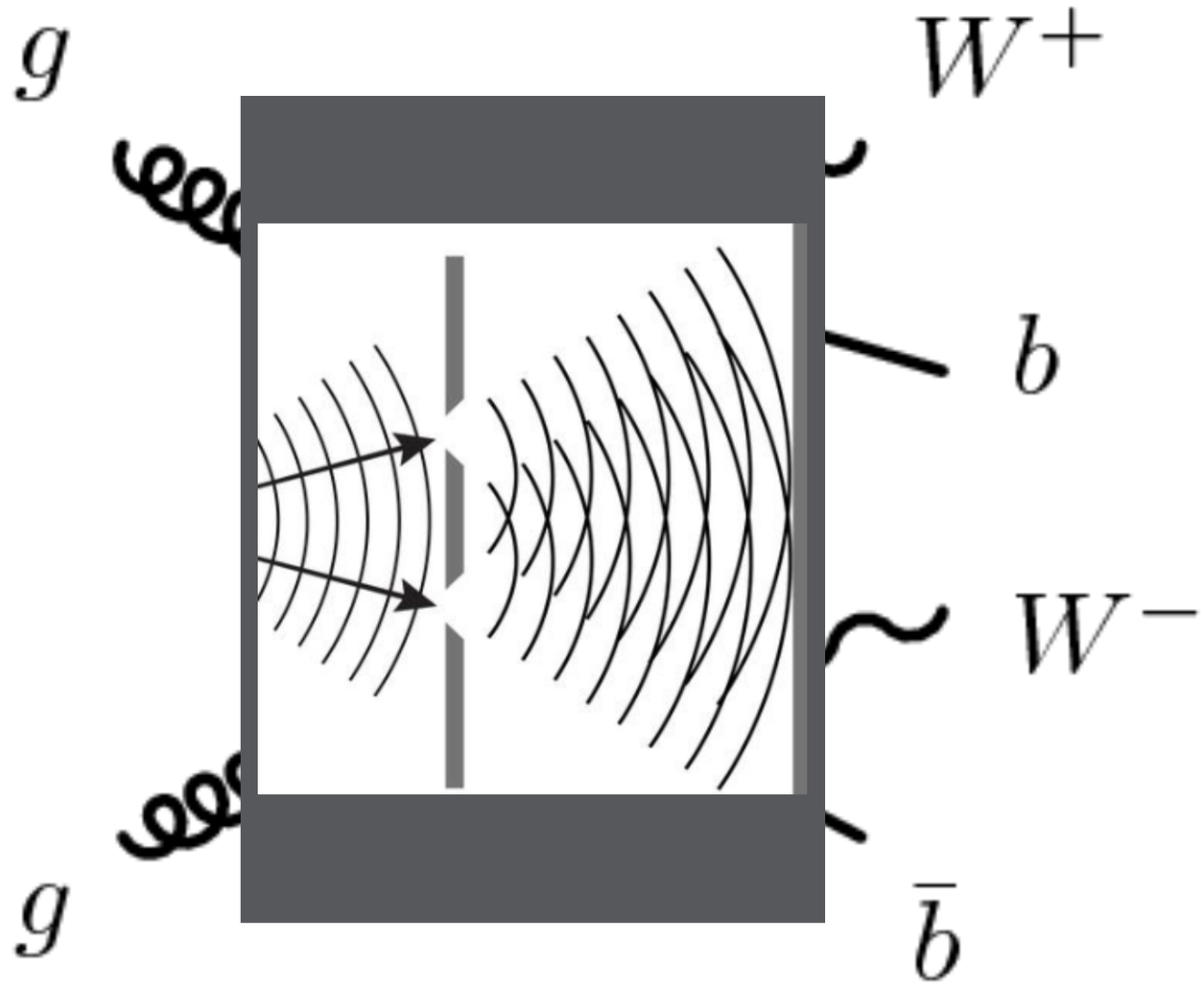


PRL 121 (2018) 152002

# tt/tW interference

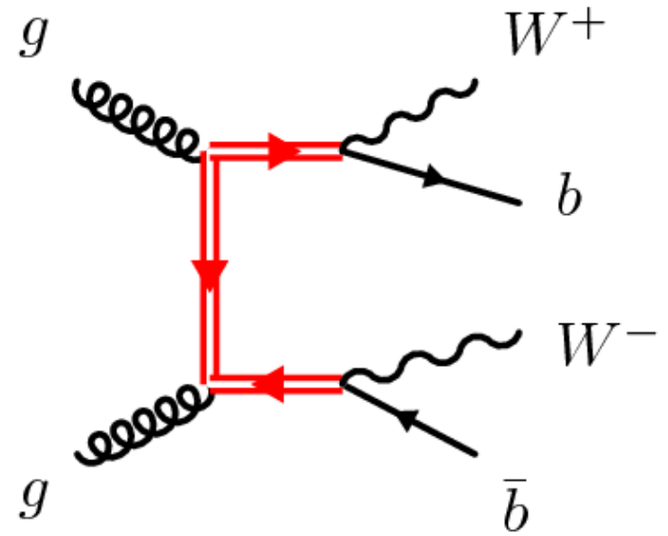
- Double slit experiment with top quarks!
- Doubly ($t\bar{t}$) and singly (tWb) resonant productions have similar final states and thus interfere
- Interference “removed” with
  - “Traditional” methods (diagram removal, diagram subtraction)
  - Fully-consistent treatment (POWHEG bb4l)



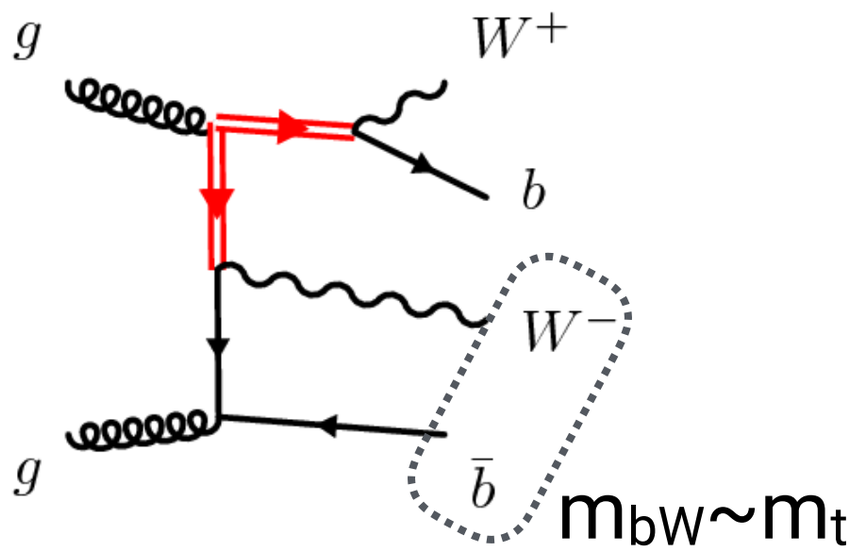
PRL 121 (2018) 152002

# tt/tW interference

- Double slit experiment with top quarks!
- Doubly ($t\bar{t}$) and singly (tWb) resonant productions have similar final states and thus interfere



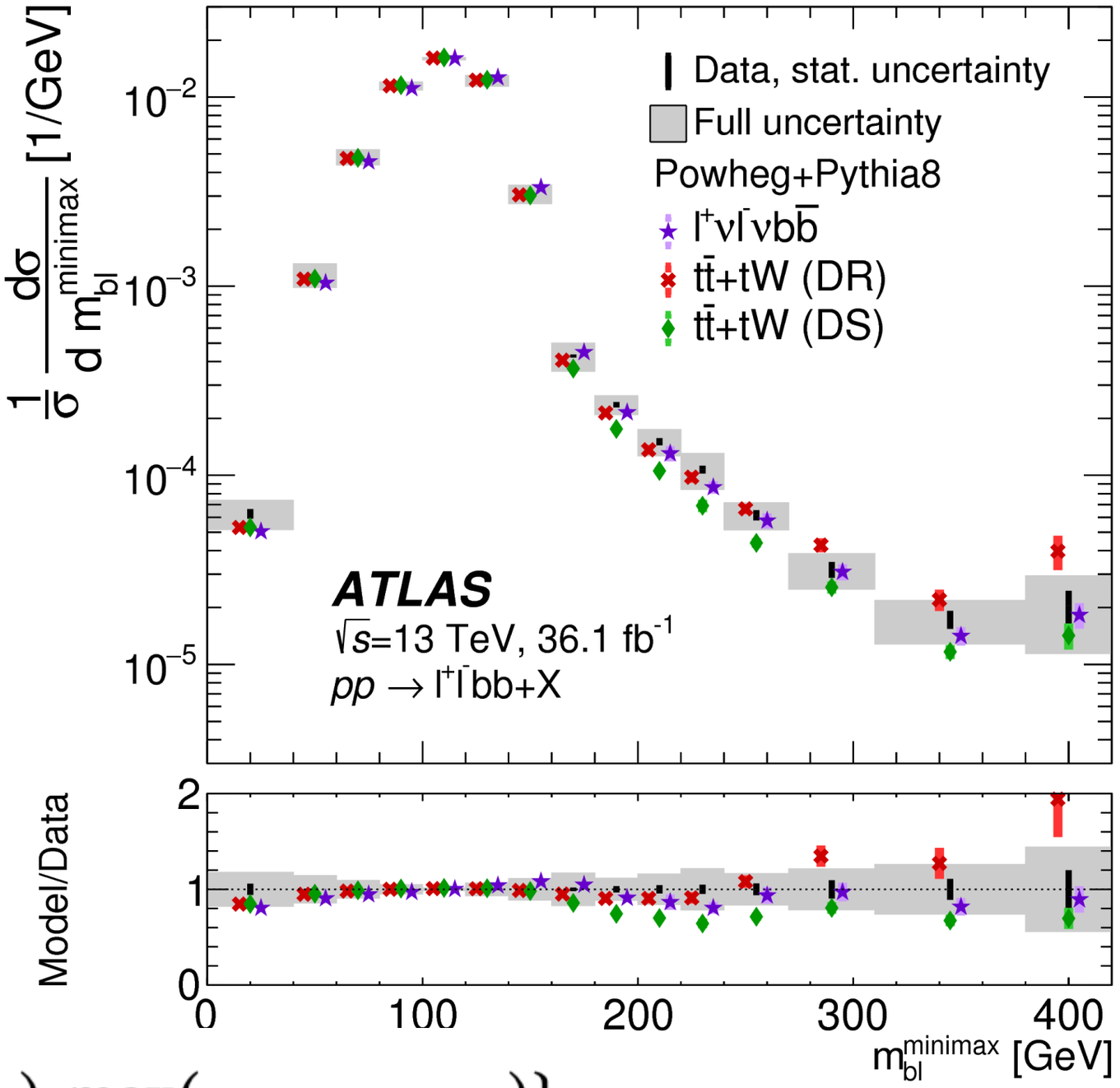

- Interference “removed” with
  - “Traditional” methods (diagram removal, diagram subtraction)
  - Fully-consistent treatment (POWHEG bb4l)



PRL 121 (2018) 152002

# tt/tW interference

- Invariant mass (b,$\ell$) characteristic distribution in presence of resonance
- $m_{b\ell}^{\text{minimax}}$ sensitive to interference effects in the tail
- Uncertainty small enough to constrain different treatments
  - Resonance-aware treatment in better agreement with data



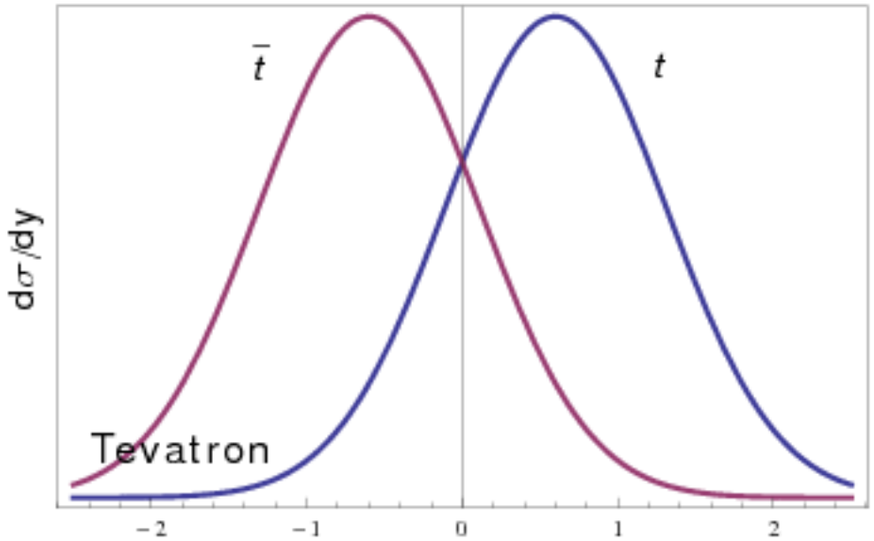

$$m_{b\ell}^{\text{minimax}} \equiv \min\{\max(m_{b_1\ell_1}, m_{b_2\ell_2}), \max(m_{b_1\ell_2}, m_{b_2\ell_1})\}$$

$$m_{b\ell}^{\text{minimax}} < \sqrt{m_t^2 - m_W^2}$$

# Charge Asymmetry

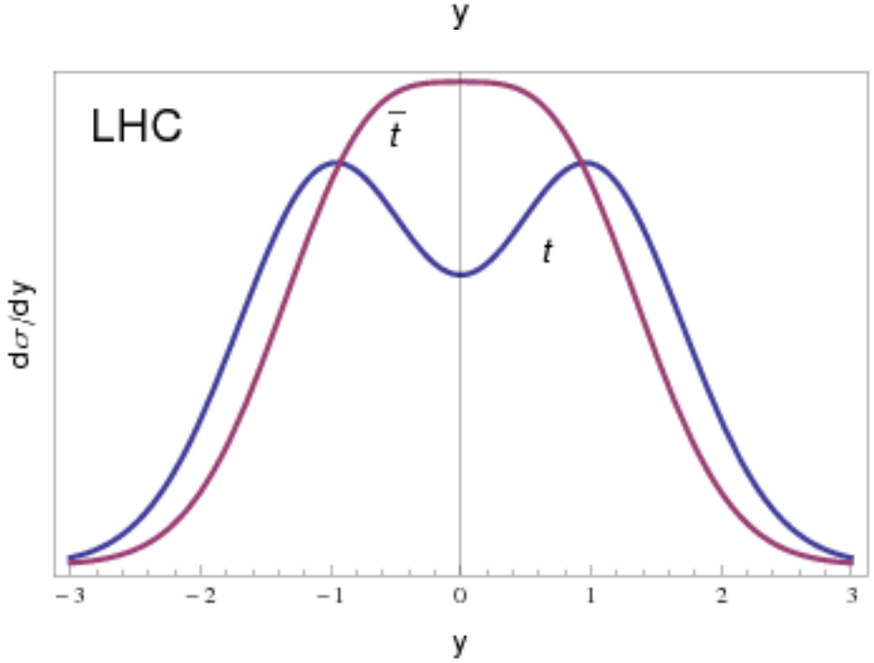
- Interference effects between LO and NLO diagrams
- Born experimentally at FNAL/Tevatron circa 2011 ($p\bar{p}$) as "forward-backward asymmetry"

$$A_{FB} = \frac{N(y_t > 0) - N(y_{\bar{t}} > 0)}{N(y_t > 0) + N(y_{\bar{t}} > 0)}$$




- CERN/LHC is pp collider, rapidity-symmetric $t\bar{t}$ production, hence different observable

$$A_{t\bar{t}} = \frac{N(\Delta y > 0) - N(\Delta y < 0)}{N(\Delta y > 0) + N(\Delta y < 0)}$$

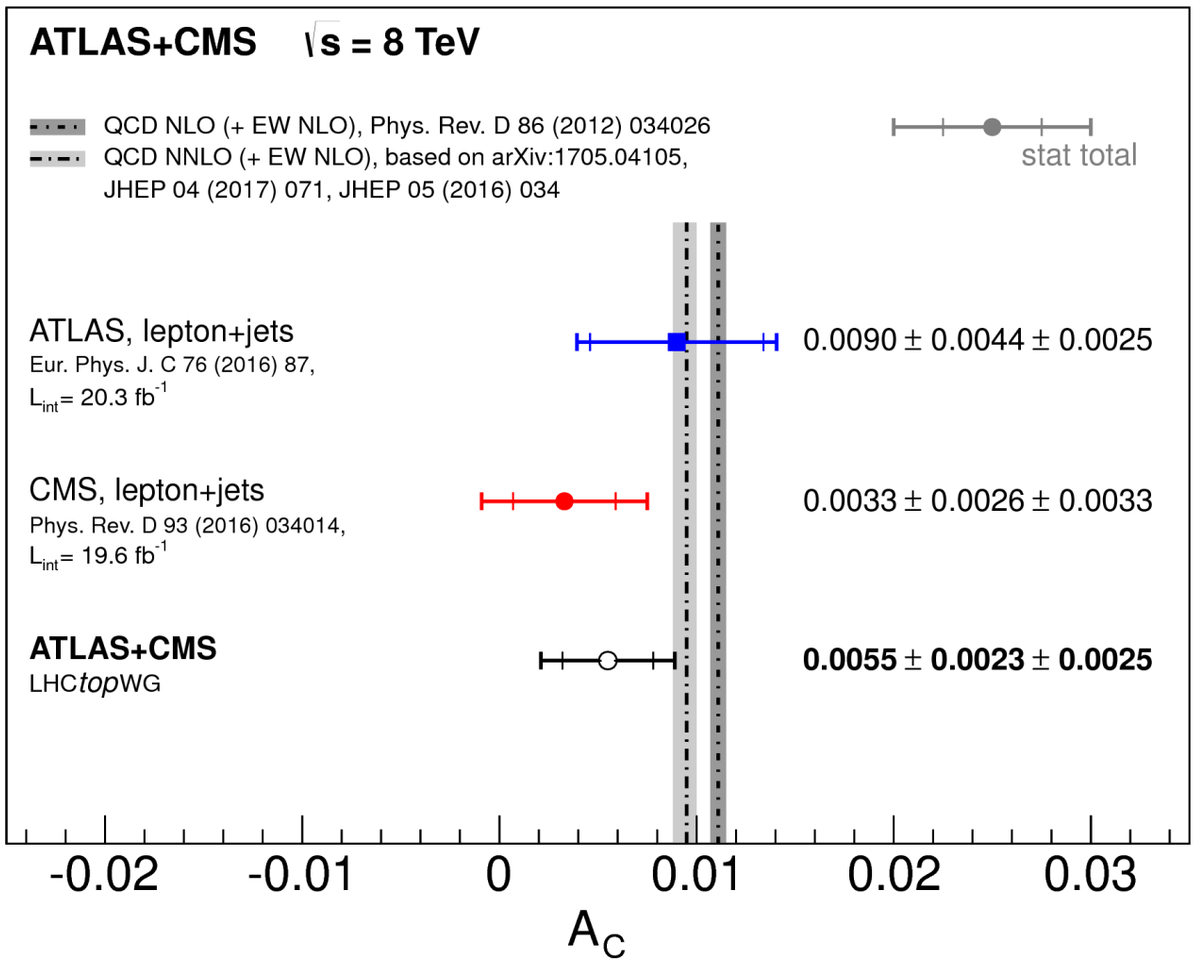




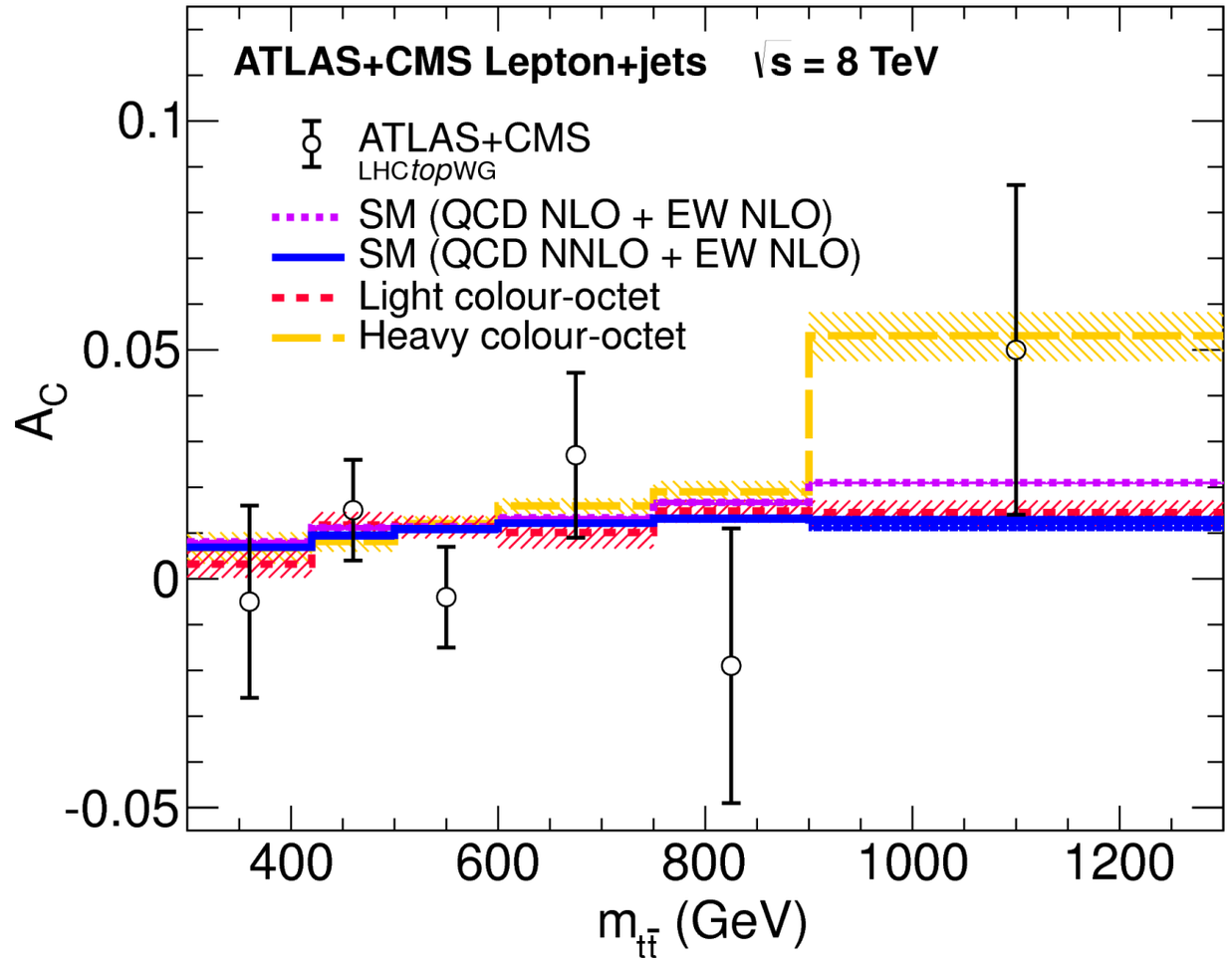
6. T. Aaltonen *et al.* [CDF Coll.], Phys. Rev. **D83** (2011) 112003 [arXiv:1101.0034 [hep-ex]].
7. [CDF Collaboration], CDF Conf. Note 10436, March 2011.
8. T. Aaltonen *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 202001 [arXiv:0806.2472 [hep-ex]].
9. V. M. Abazov *et al.* [D0 Coll.], Phys. Rev. D **84** (2011) 112005 [arXiv:1107.4995 [hep-ex]].
10. [D0 Collaboration], D0 Note 6062-CONF, July 2010.
11. V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 142002 [arXiv:0712.0851 [hep-ex]].

# Charge Asymmetry

## Inclusive $t\bar{t}$




## Differential $t\bar{t}$ ($A_C$ vs $m_{tt}$)



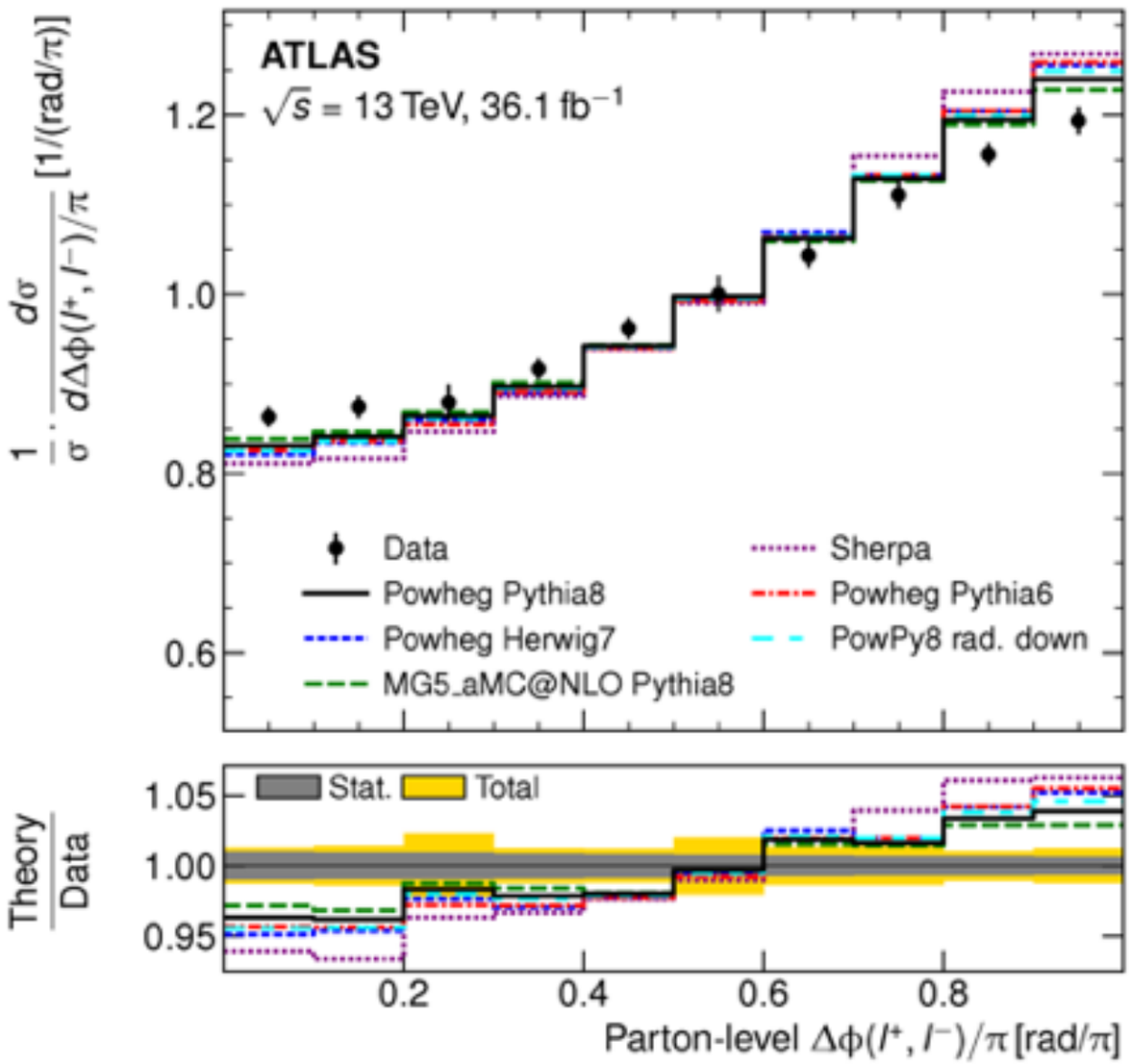

- The precision of the **combination** is significantly **improved** wrt individual measurements.
- In **agreement with SM** calculations at NLO and NNLO and also compatible with zero asymmetry

arXiv:1903.07570

# Spin Correlations

$$x_i = f_{\mathrm{SM}} \cdot x_{\mathrm{spin},\, i} + (1 - f_{\mathrm{SM}}) \cdot x_{\mathrm{nospin},\, i}$$

- In the SM, the spins of the two tops are completely correlated ($f_{\mathrm{SM}}$=1), hence leptons' P4
- Additional particles or non-standard couplings can change the effective correlation…
- …but also higher-order terms have an impact
- Top $p_{\mathrm{T}}$ reweighting consistent with NNLO calculation, does not explain the discrepancy

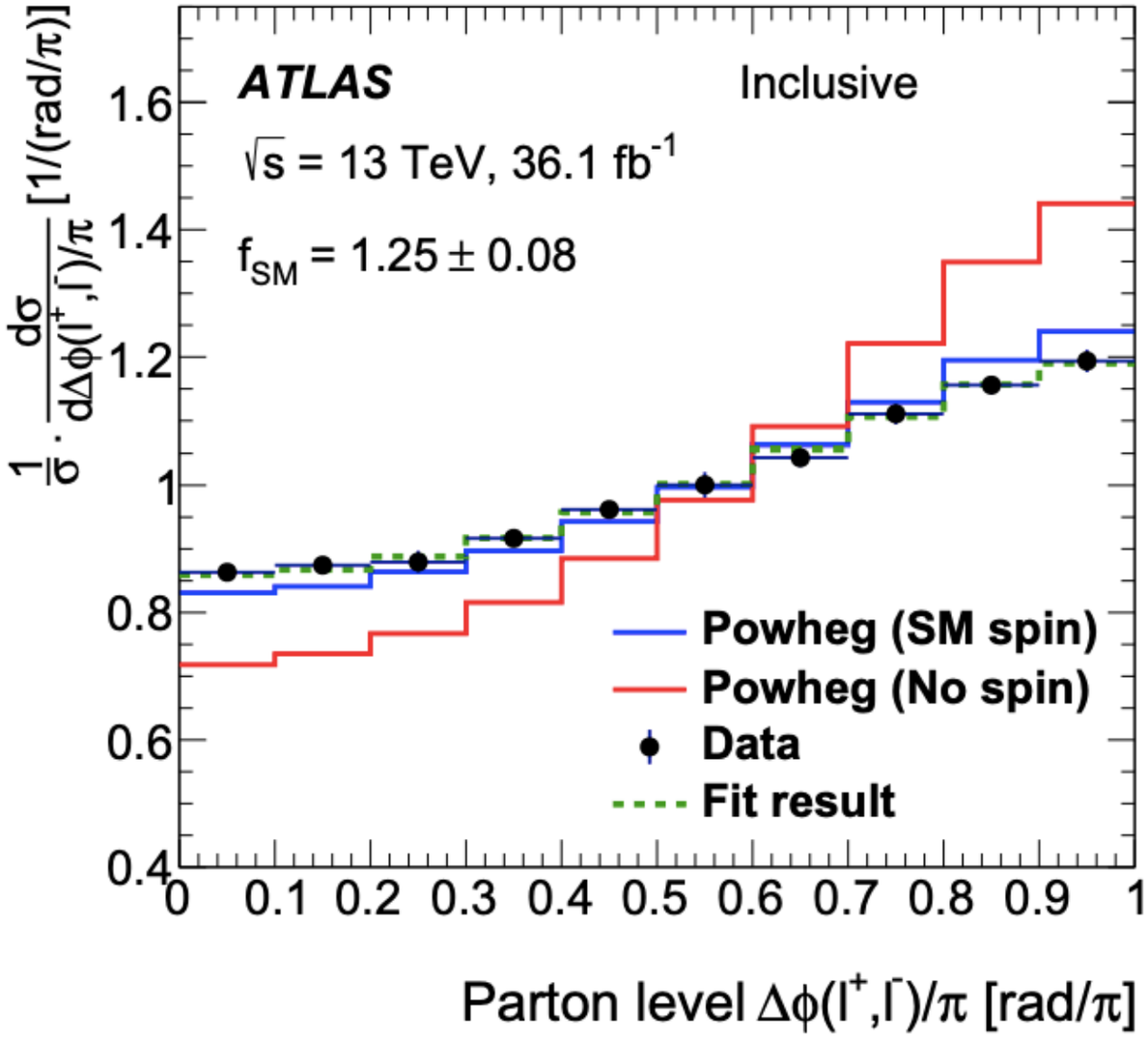


arXiv:1903.07570

# Spin Correlations

$$x_i = f_{\mathrm{SM}} \cdot x_{\mathrm{spin},\,i} + (1 - f_{\mathrm{SM}}) \cdot x_{\mathrm{nospin},\,i}$$

- In the SM, the spins of the two tops are completely correlated ($f_{\mathrm{SM}}$=1), hence leptons' P4
- Additional particles or non-standard couplings can change the effective correlation…
- …but also higher-order terms have an impact
- Top $p_{\mathrm{T}}$ reweighting consistent with NNLO calculation, does not explain the discrepancy

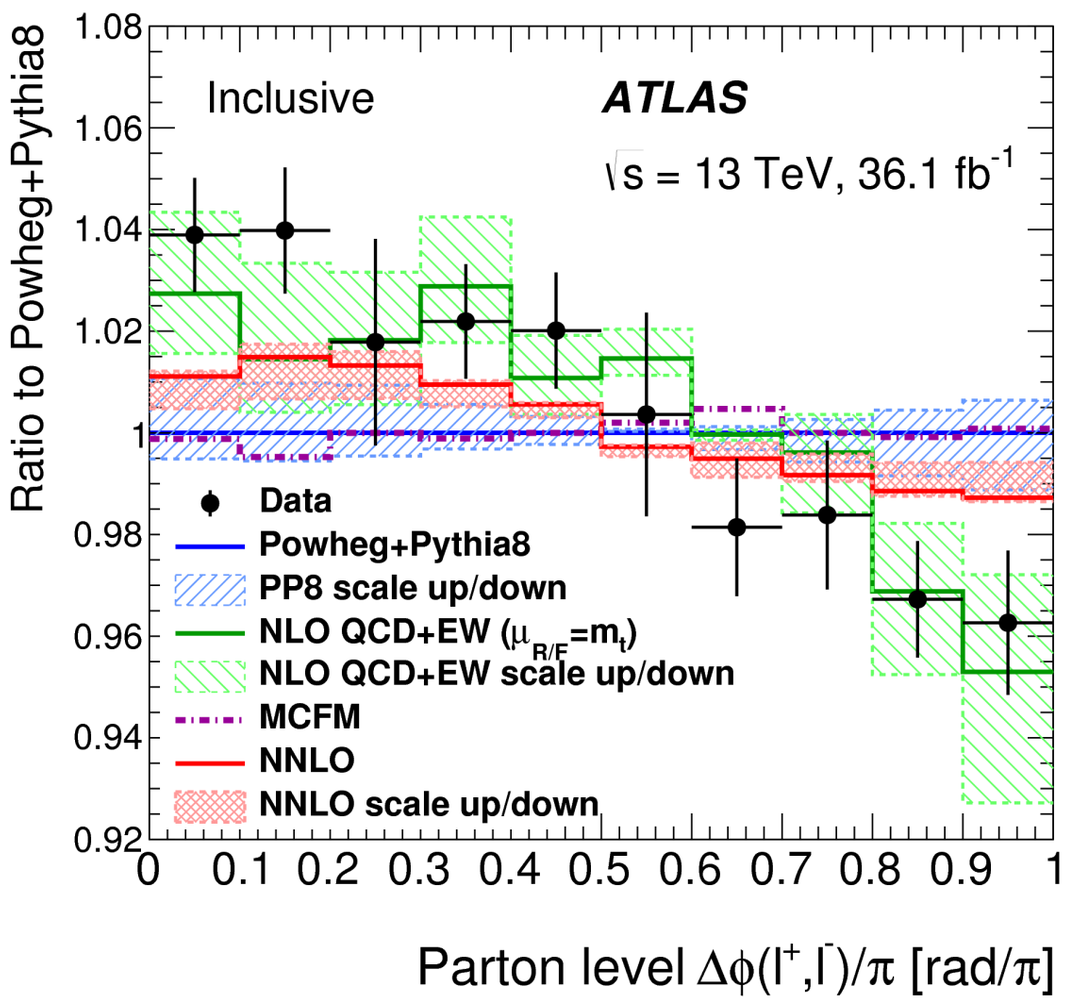


# Spin Correlations

arXiv:1903.07570

| Region | $f_{SM}$ ± (stat.,syst.,theory) | Significance (excl. theory uncertainties) |
|---|---|---|
| Inclusive | $1.249 \pm 0.024 \pm 0.061 \pm 0.040$ | 3.2 (3.8) |
| $m_{t\bar{t}} < 450$ GeV | $1.12 \pm 0.04\ ^{+0.12}_{-0.13} \pm 0.02$ | 0.86 (0.87) |
| $450 \leq m_{t\bar{t}} < 550$ GeV | $1.18 \pm 0.08\ ^{+0.13}_{-0.14} \pm 0.08$ | 1.0 (1.1) |
| $550 \leq m_{t\bar{t}} < 800$ GeV | $1.65 \pm 0.19\ ^{+0.31}_{-0.41} \pm 0.22$ | 1.3 (1.4) |
| $m_{t\bar{t}} \geq 800$ GeV | $2.2 \pm 0.9\ ^{+2.5}_{-1.7} \pm 0.7$ | 0.58 (0.61) |

Best-fit $f_{SM}$ increases with $m_{tt}$, but large uncertainties reduce significance



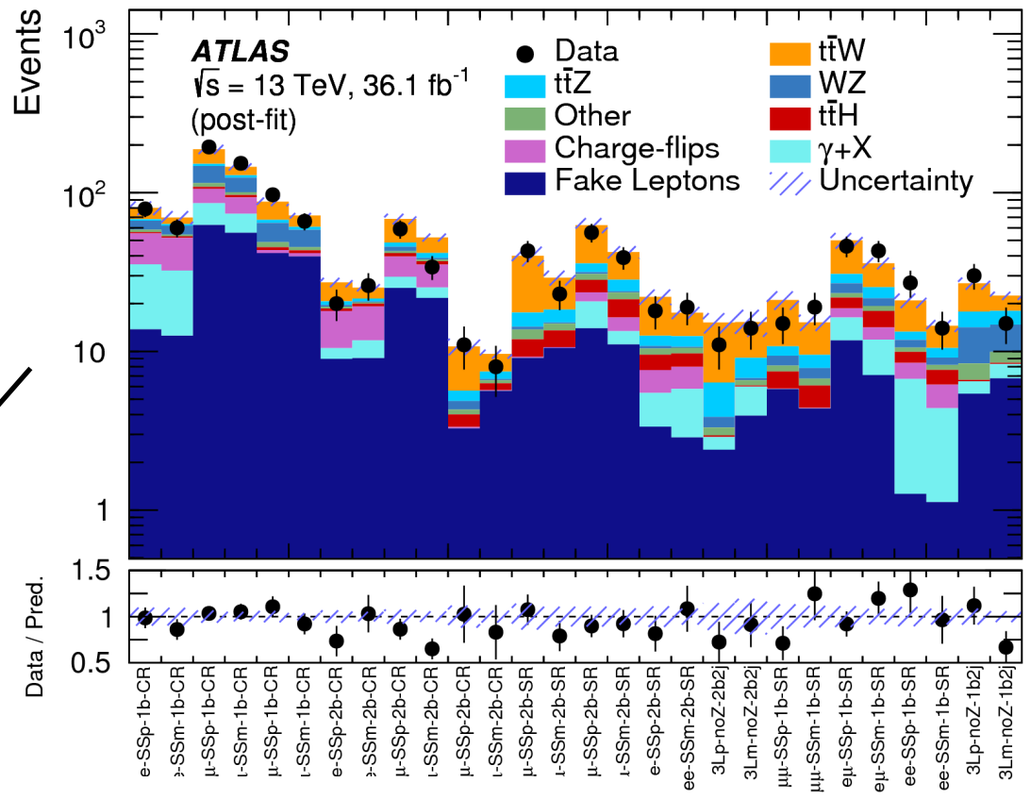

Data/NLO QCD+EW good agreement, but scale $\mu=m_{top}$ very *ad hoc* and yielding large systematics

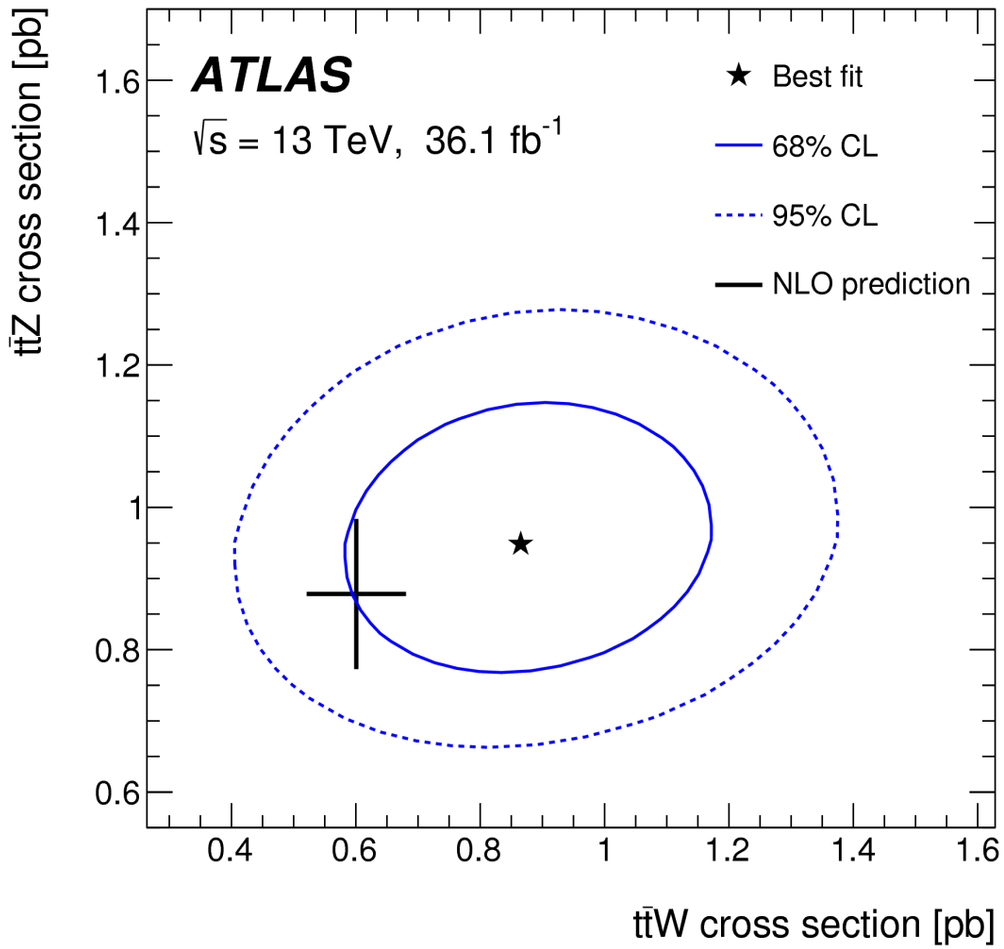
Problem with calculation…or new physics?

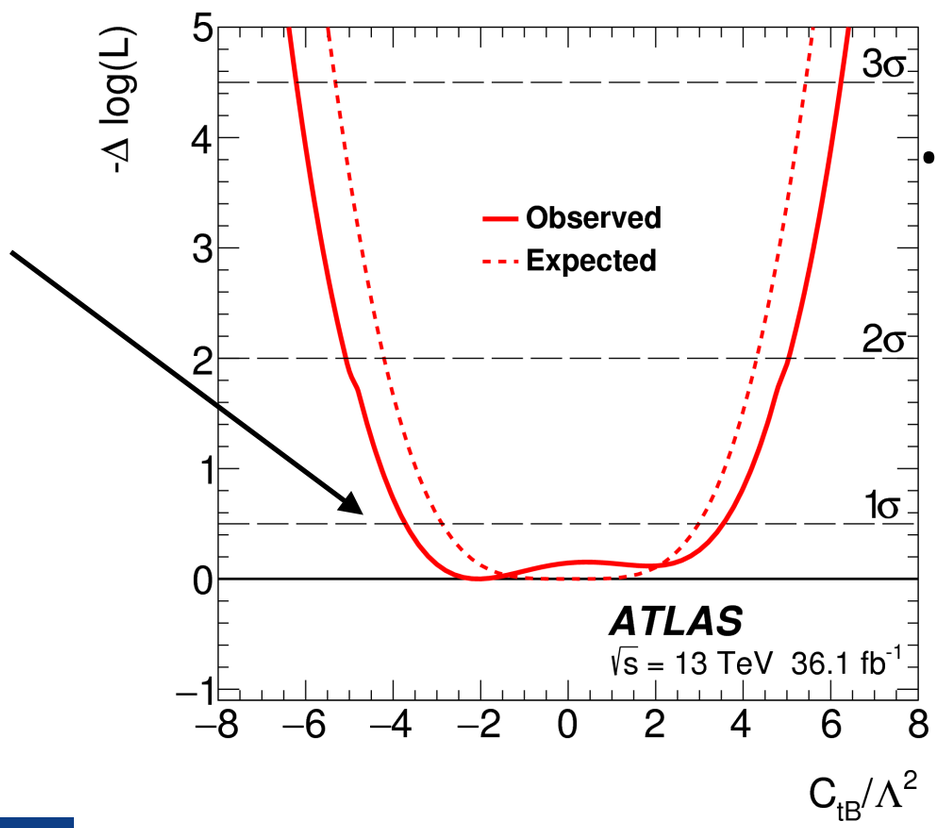
# tt+W/Z

PRD 99 (2019) 072009

- Many final states with 2–4 leptons
- Observed cross-sections in agreement with SM



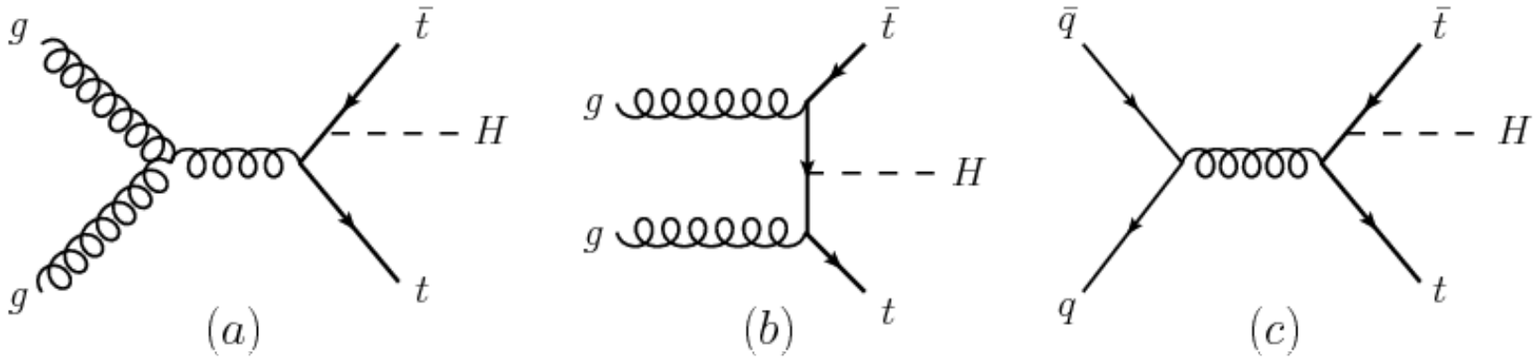




- Limits set to EFT $O_6$ Wilson coefficients

Phys. Lett. B 784 (2018) 173

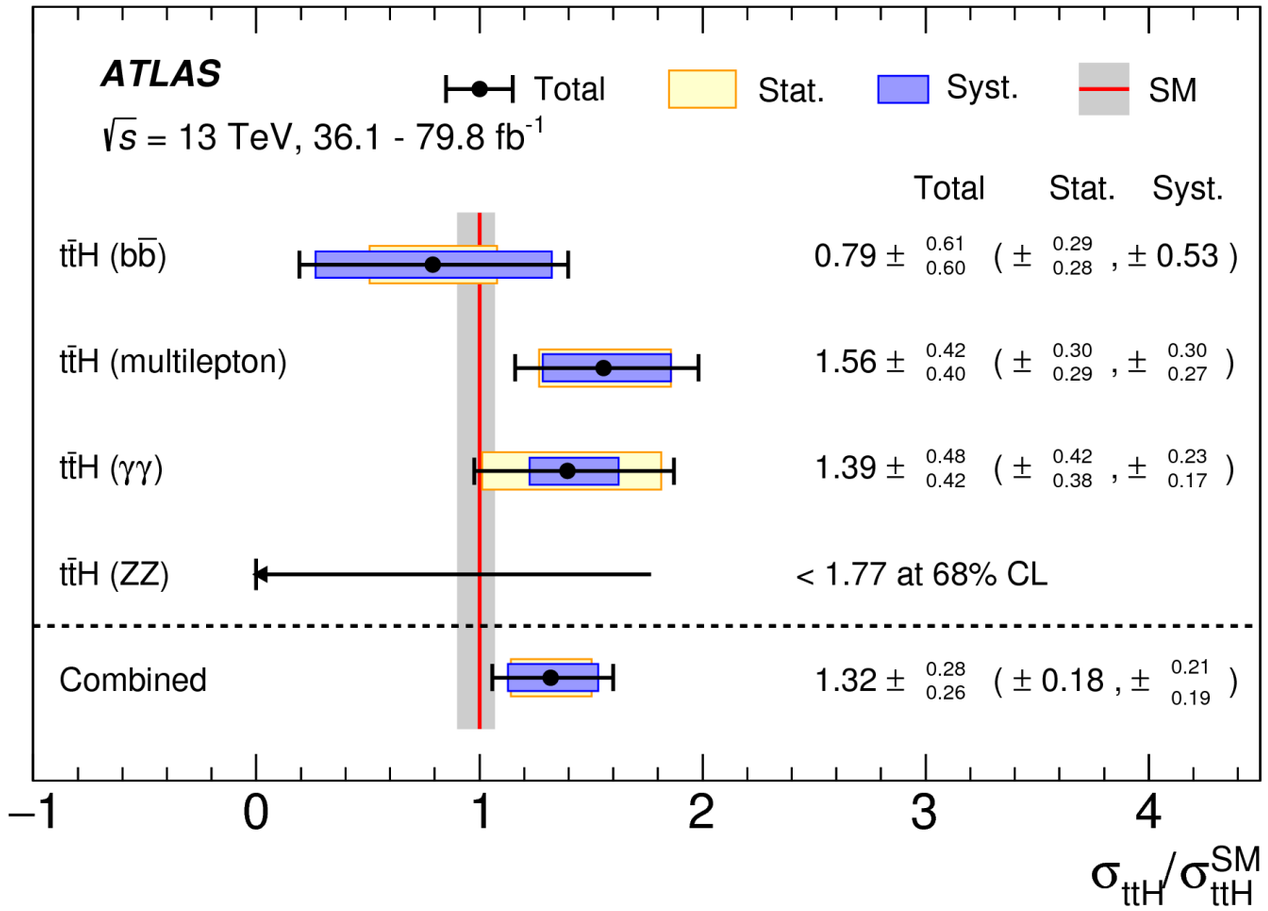
# tt+H (or H+tt ?)

- Probes Yukawa coupling (is the top quark the only "natural" quark?)
- Combination of $H \to b\bar{b}, WW^*, \tau\tau, \gamma\gamma, ZZ^*$ $>5\sigma$



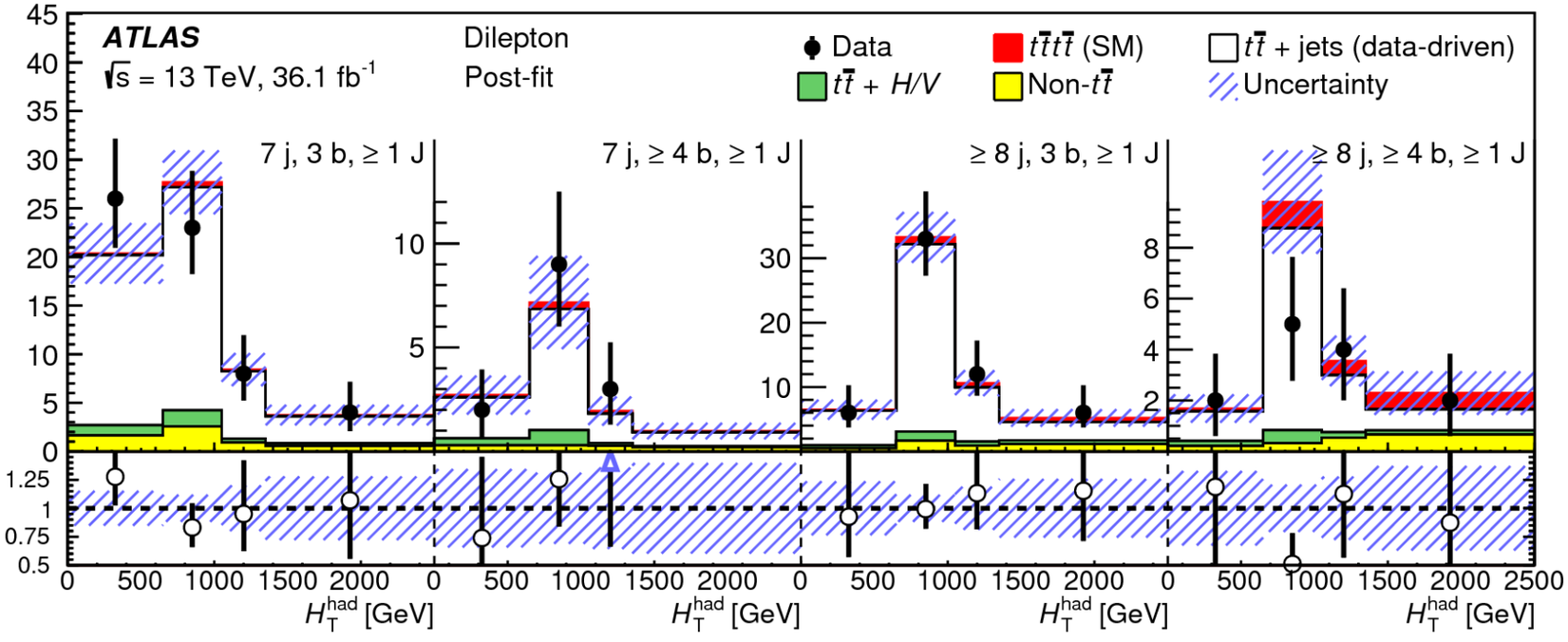


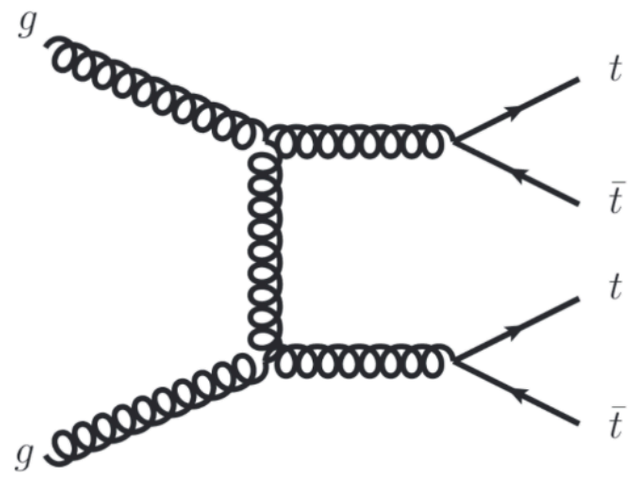




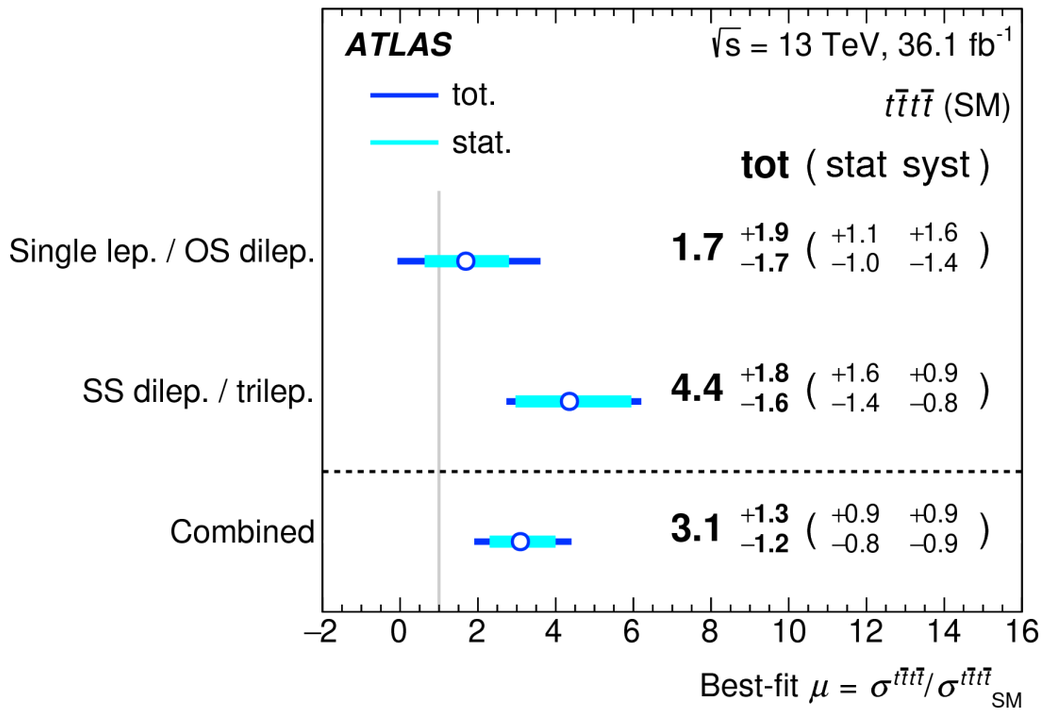
Phys. Rev. D 99 (2019) 052009

# tt+tt




- Very small SM cross-section, but enhanced in many BSM models
- Background to tt+H, very complicated final state



# Top Mass and Width

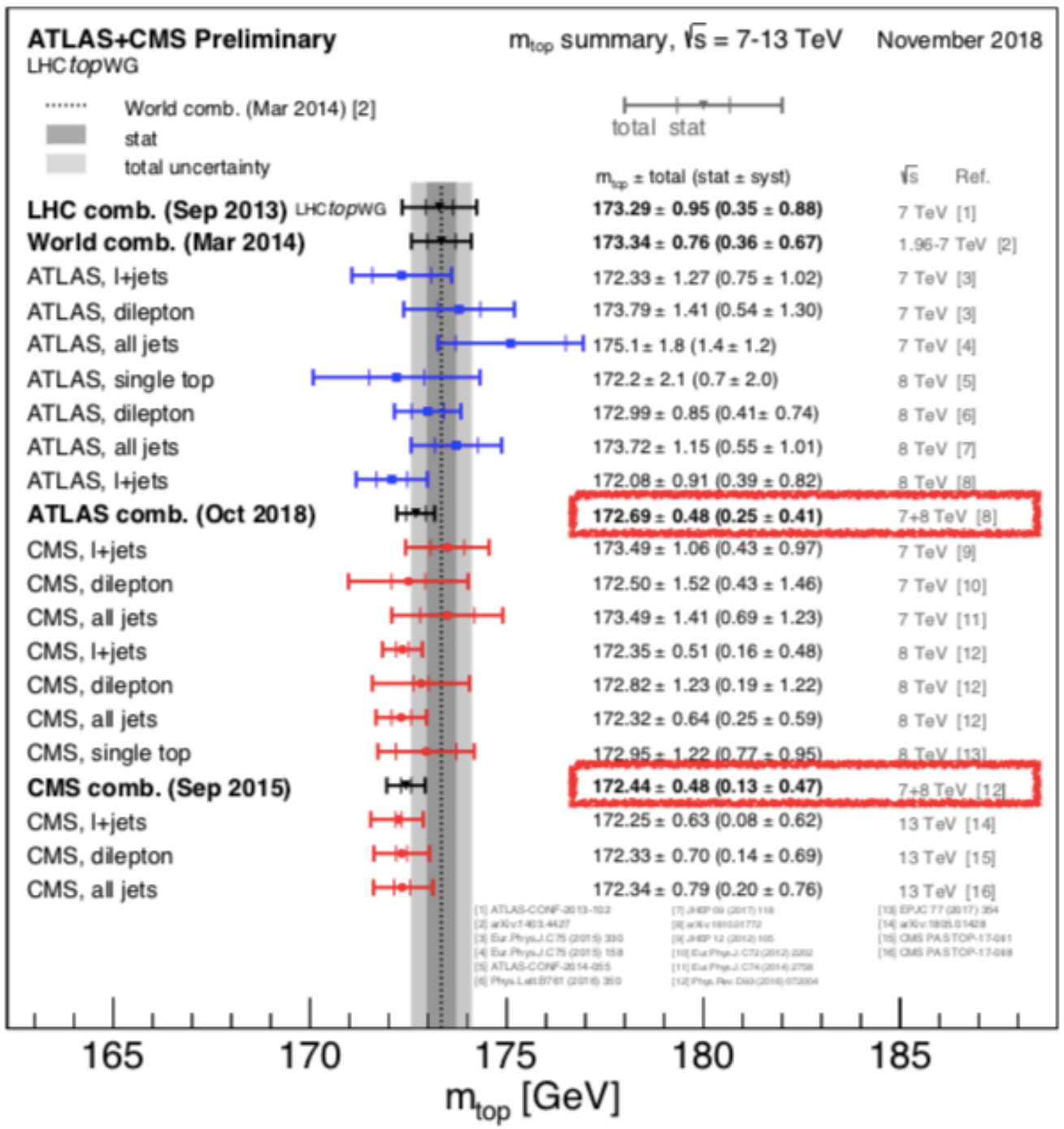
**“Isn’t the top quark just two numbers?”**

# Top Mass

- No consensus on actual definition when precision < 0.5 GeV ~$\Lambda_{QCD}$.
  Not a matter of taste but a profound lack of a clear definition.

- **Direct** measurements: invariant mass of decay products: $M_{\ell b}$, $M_{\ell J/\psi}$ (“MC mass”)

- **Indirect** measurements: measure some property that has a known dependence on top mass, *e.g.* cross-section, $\rho_S$



# Words of Wisdom

**“A mass parameter extracted from a measurement depends mostly on an observable rather than a simulation tool”**

*–Kirill Melnikov, Paolo Nason*
*SM@LHC 2019, Zurich*

**“Mass is the parameter most precisely known but imprecisely understood”**

*Paul Grannis,*
*The coming of age of the top quark*

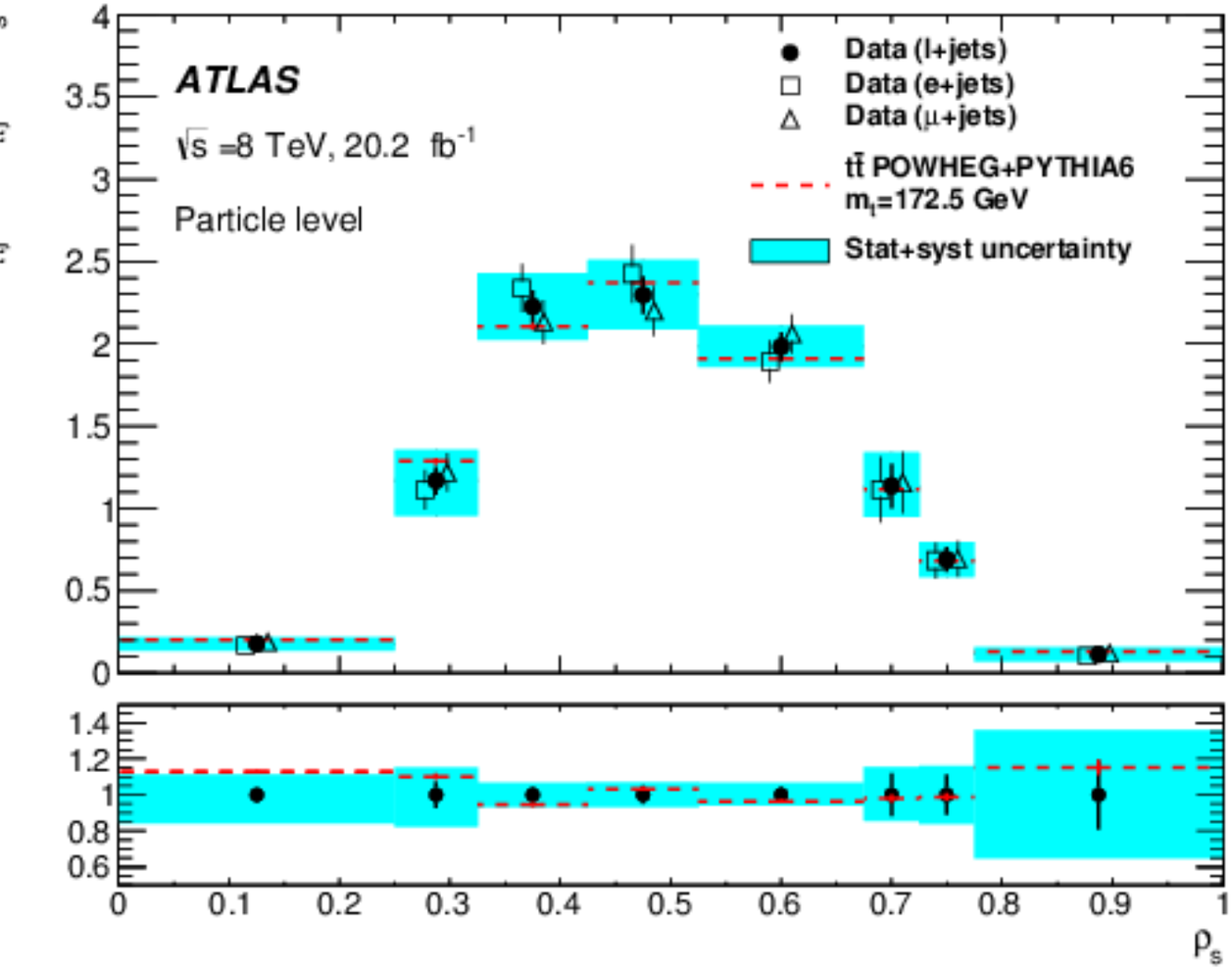
arXiv:1905.02302

# Top mass (indirect)

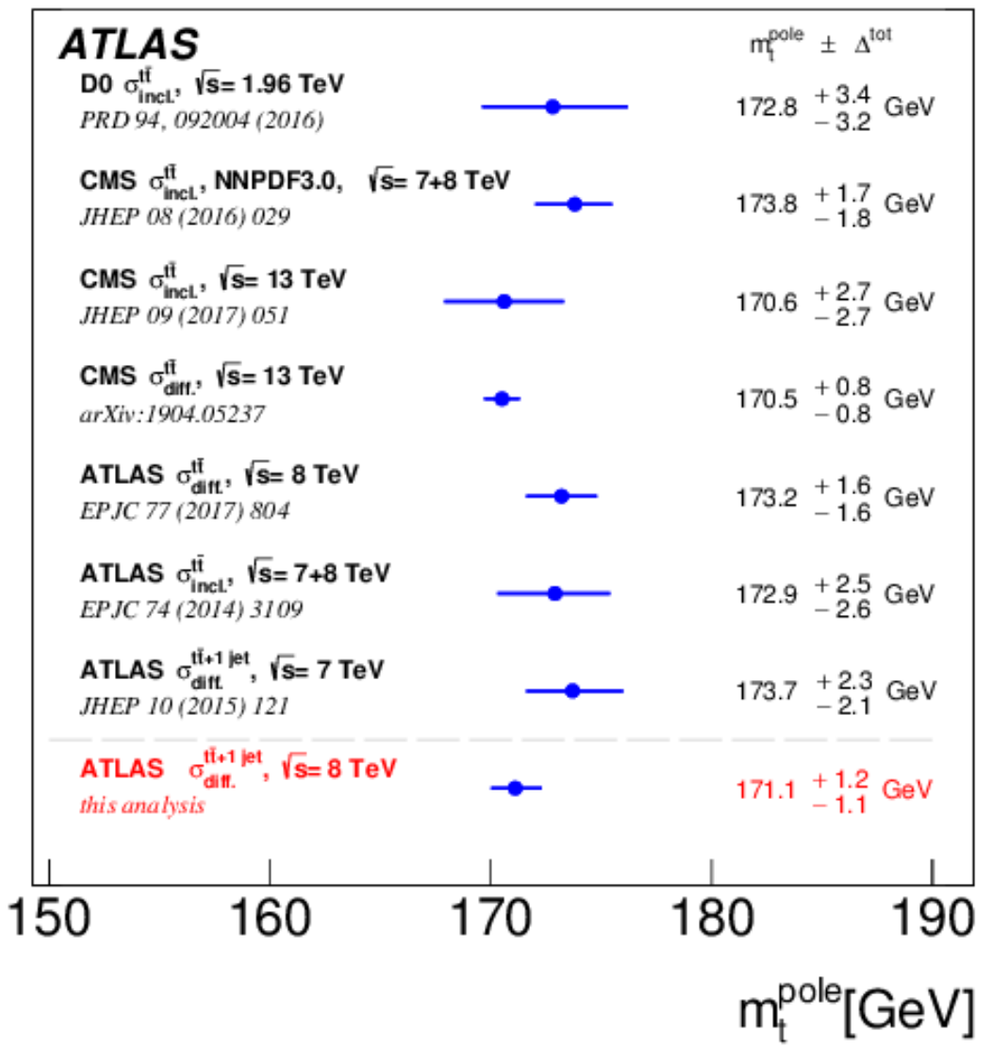
- Total and differential cross-section(s) depend on top mass
- Cross-section of tt+1jet depends on the top mass

$$\mathcal{R}(m_t^{\text{pole}}, \rho_s) = \frac{1}{\sigma_{t\bar{t}+1\text{-jet}}} \cdot \frac{\mathrm{d}\sigma_{t\bar{t}+1\text{-jet}}}{\mathrm{d}\rho_s}$$

$$\rho_s = \frac{2 \times 170\ GeV}{m_{t\bar{t}+1j}}$$

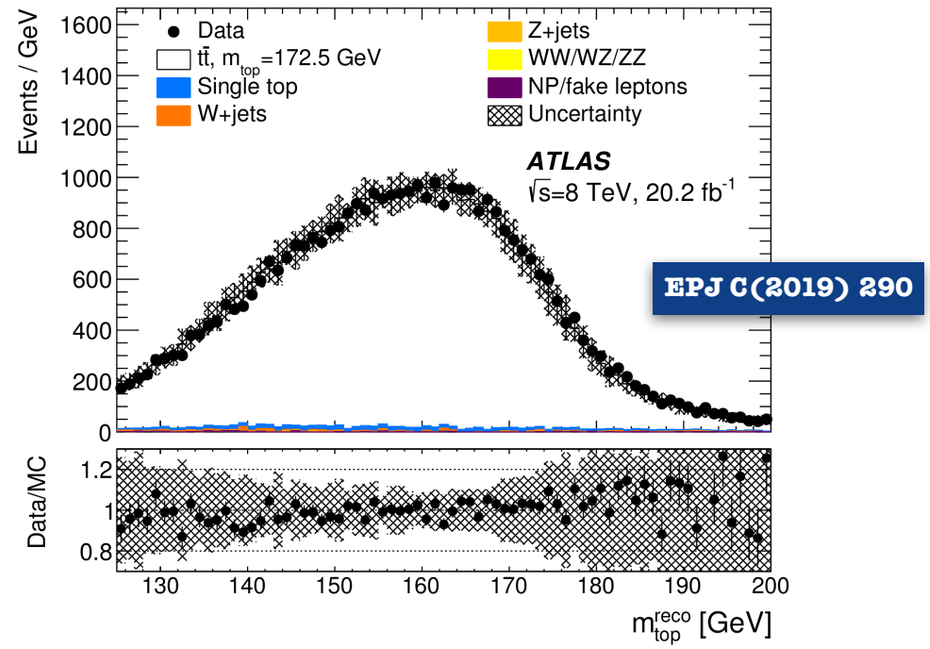



$$m_t^{\text{pole}} = 171.1 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 0.9(\text{syst}) \,^{+0.7}_{-0.3}(\text{theo})\ \text{GeV}$$



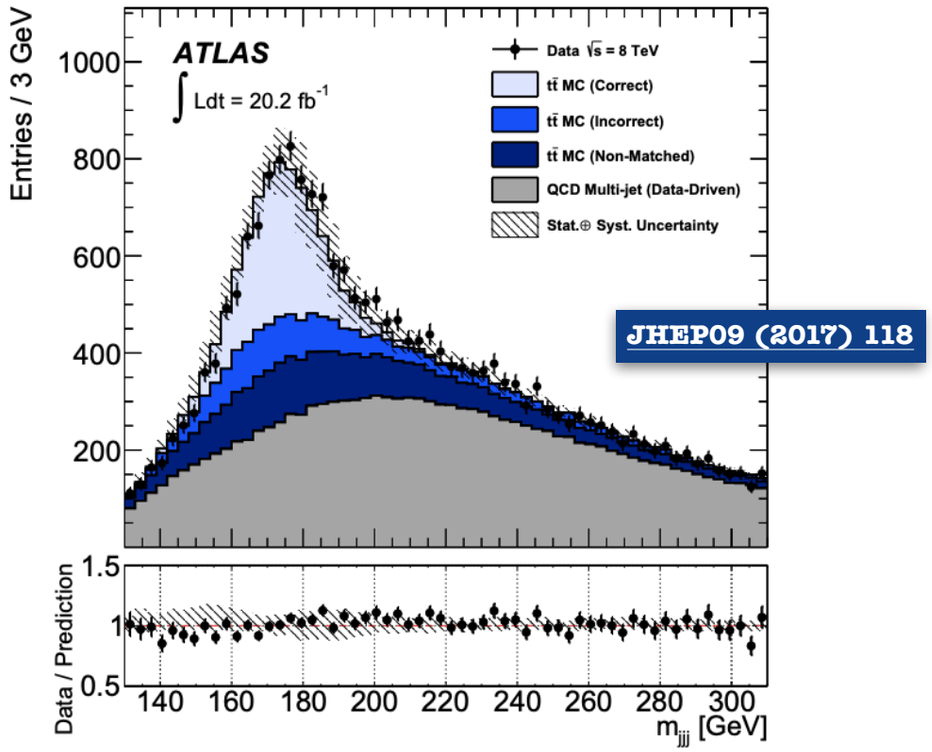
# Top mass (direct)

- $t\bar{t}$→lepton + jets, clean signature
  - Exploiting a 3D template technique, the top quark mass is determined together with a **global jet energy scale** factor and a **relative b-to-light-jet energy scale** factor.



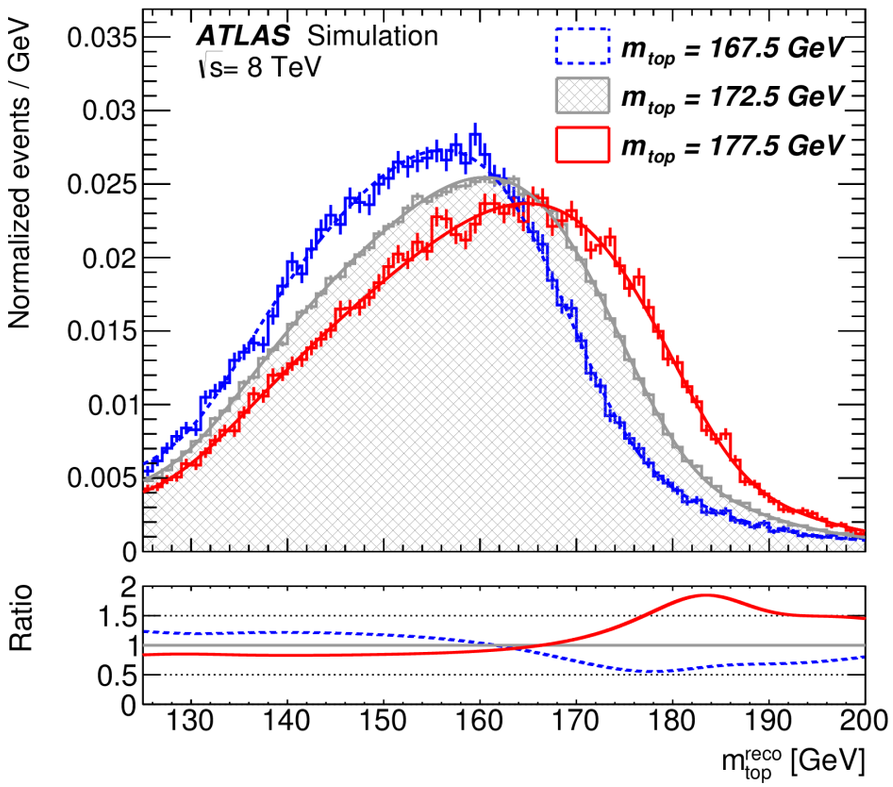

EPJ C(2019) 290

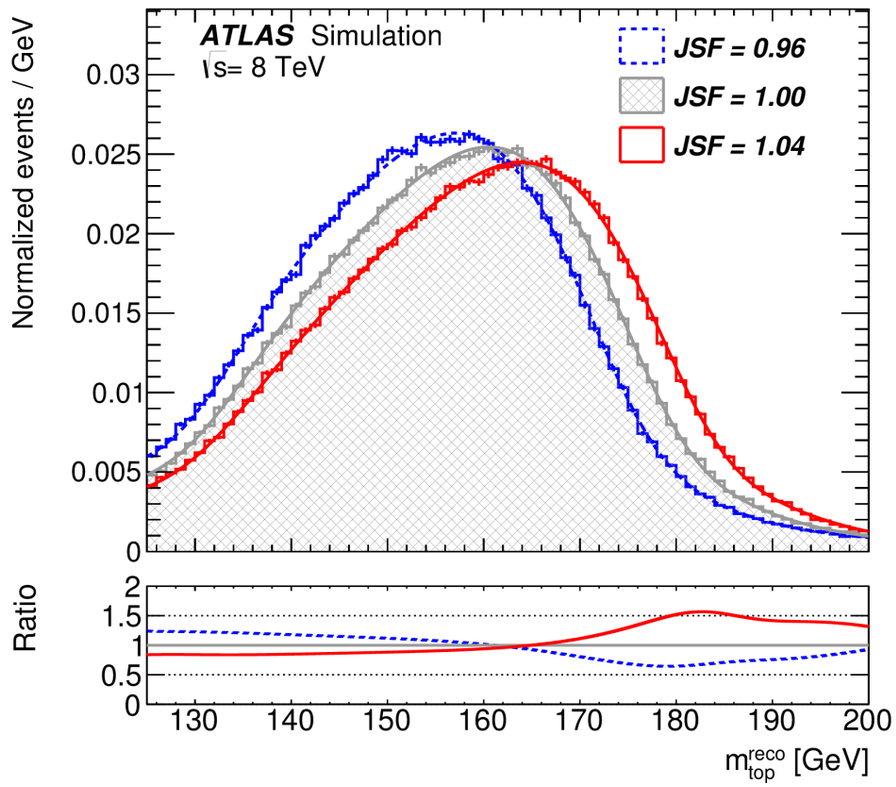
- $t\bar{t}$→all jets, large BR, full kin reco, data-driven bkg ( $N_b$,$\Delta\phi(b,W)$ )
  - Ratio of invariant masses $R_{3/2} = \frac{m_{jjj}}{m_{jj}} \sim \frac{m_{top}}{m_W}$

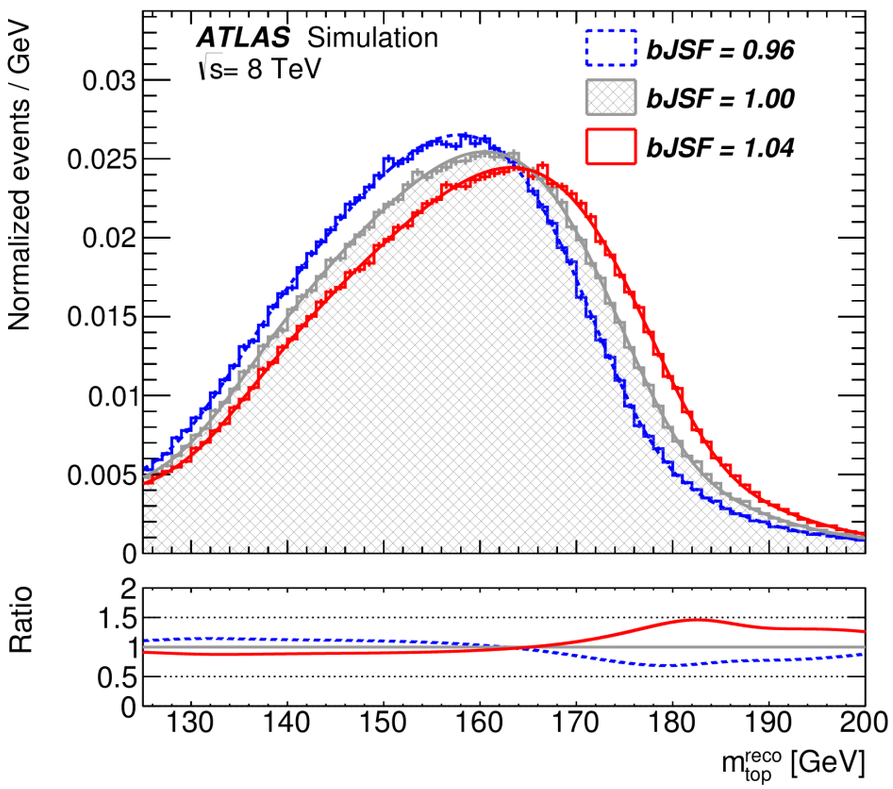


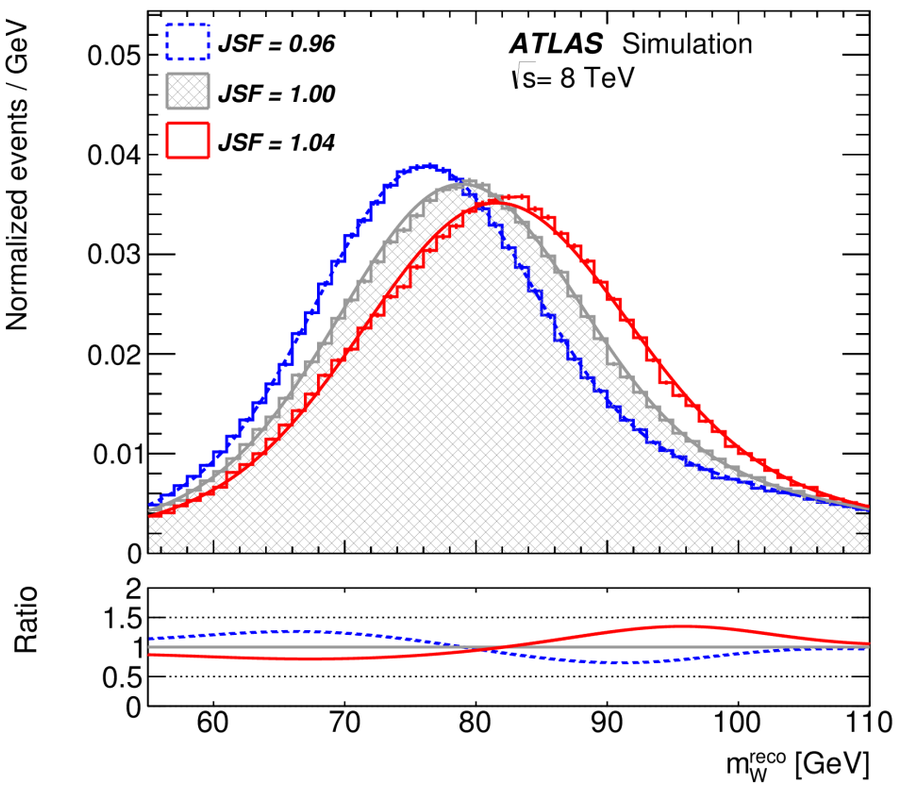

JHEP09 (2017) 118

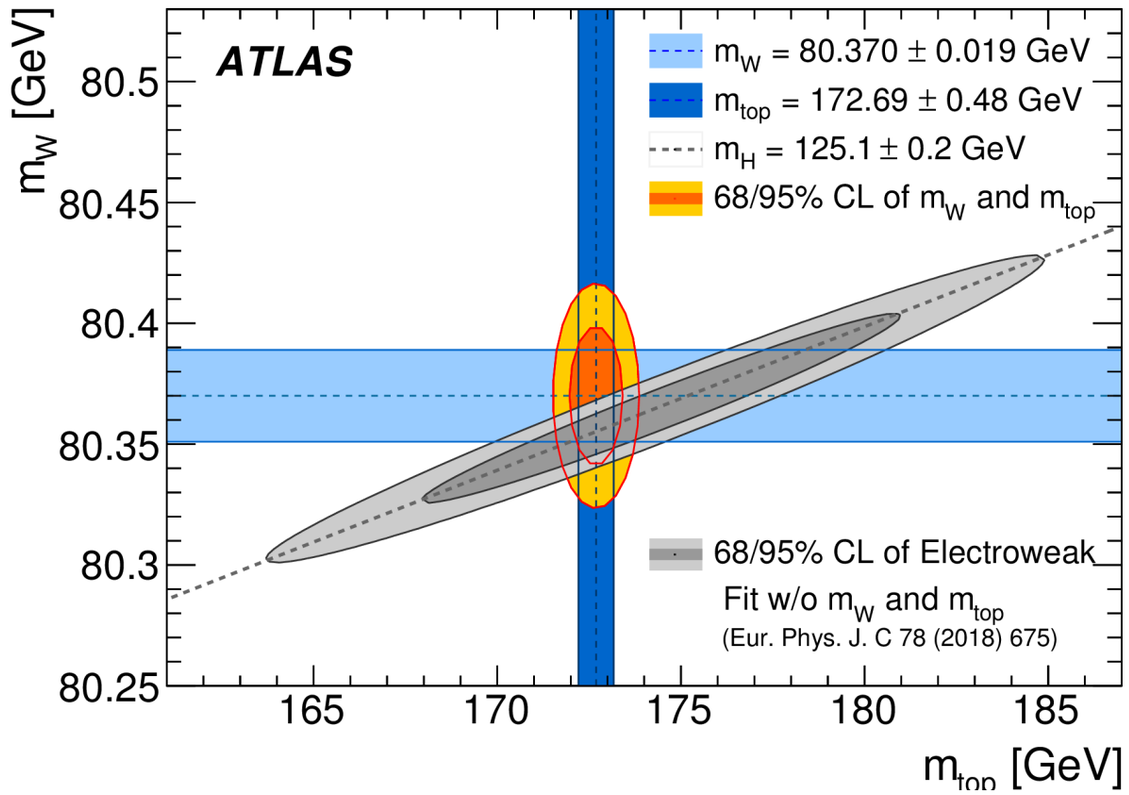
# Observables dependent on JES, bJES and $m_{top}$

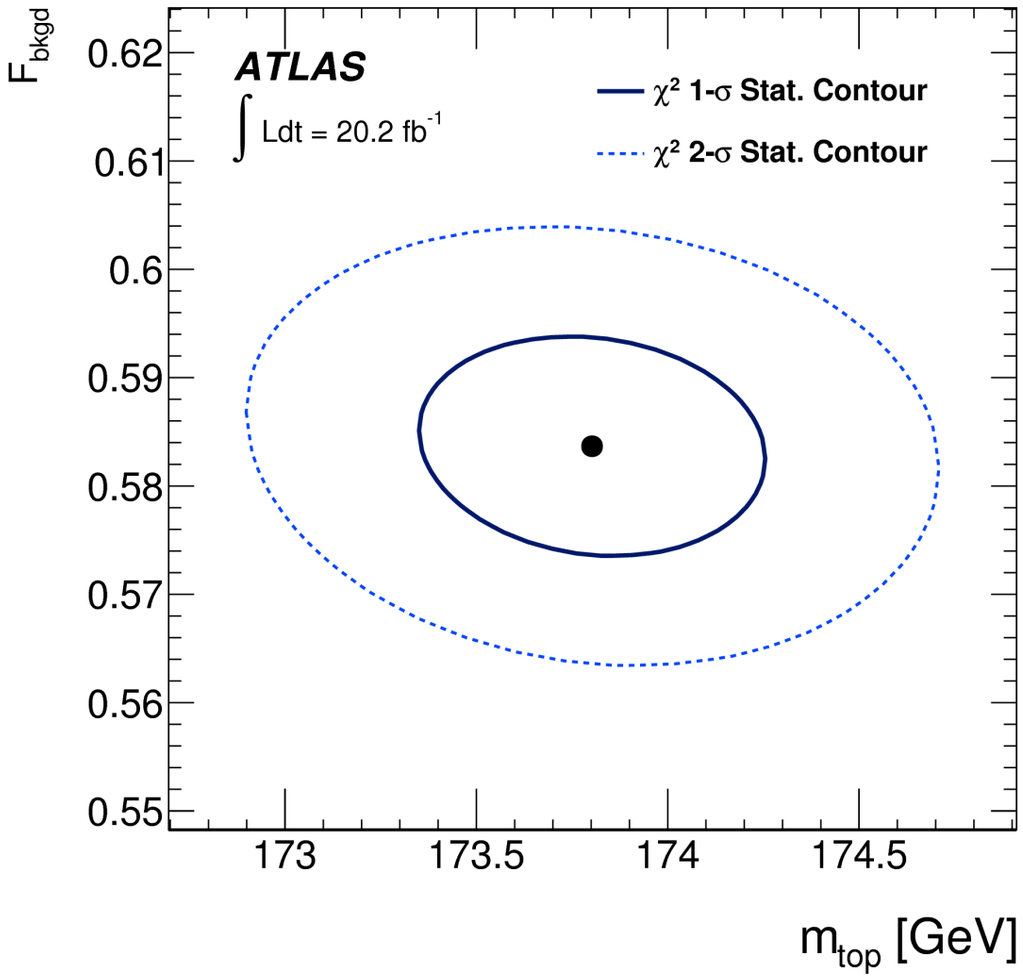


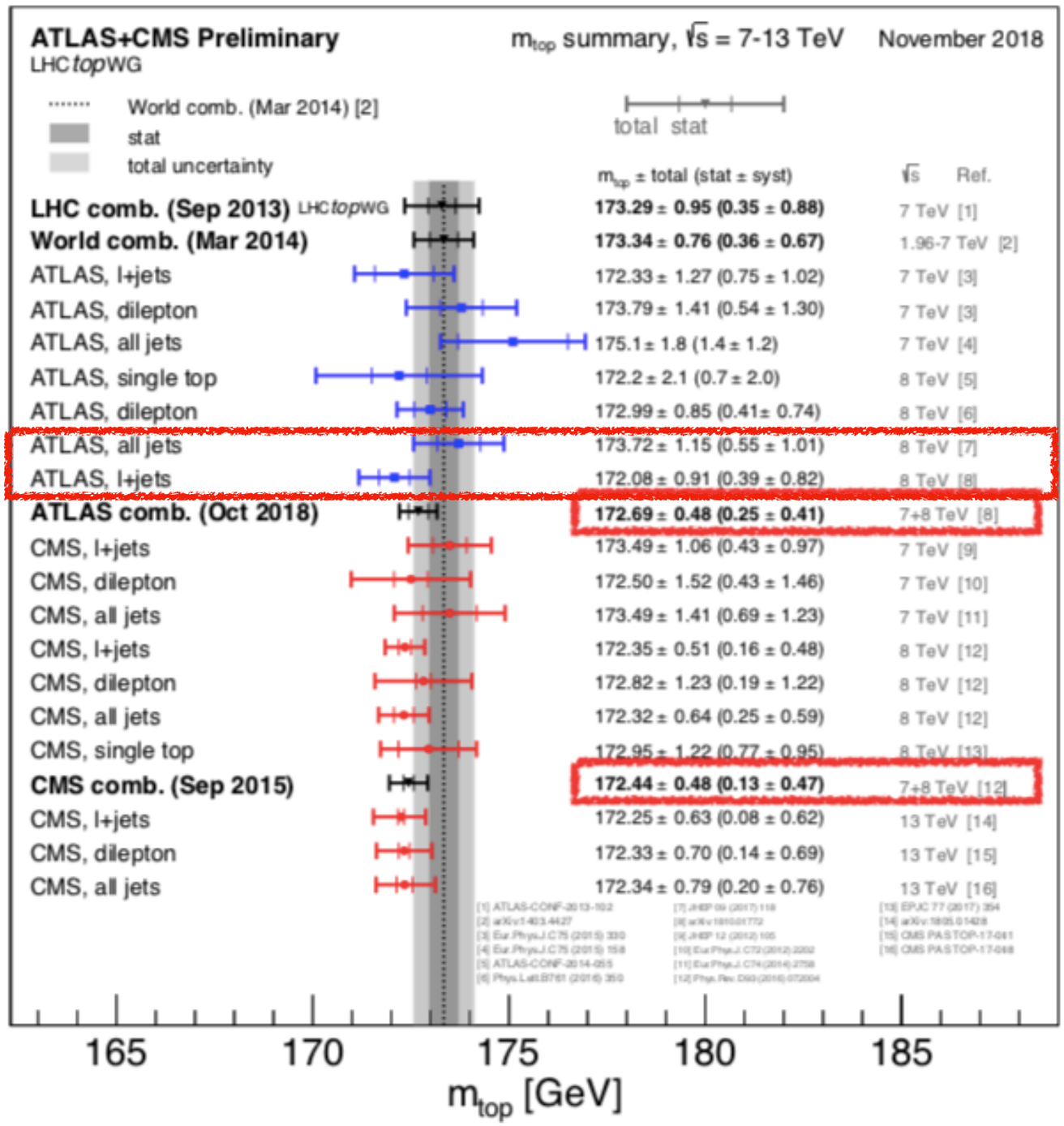



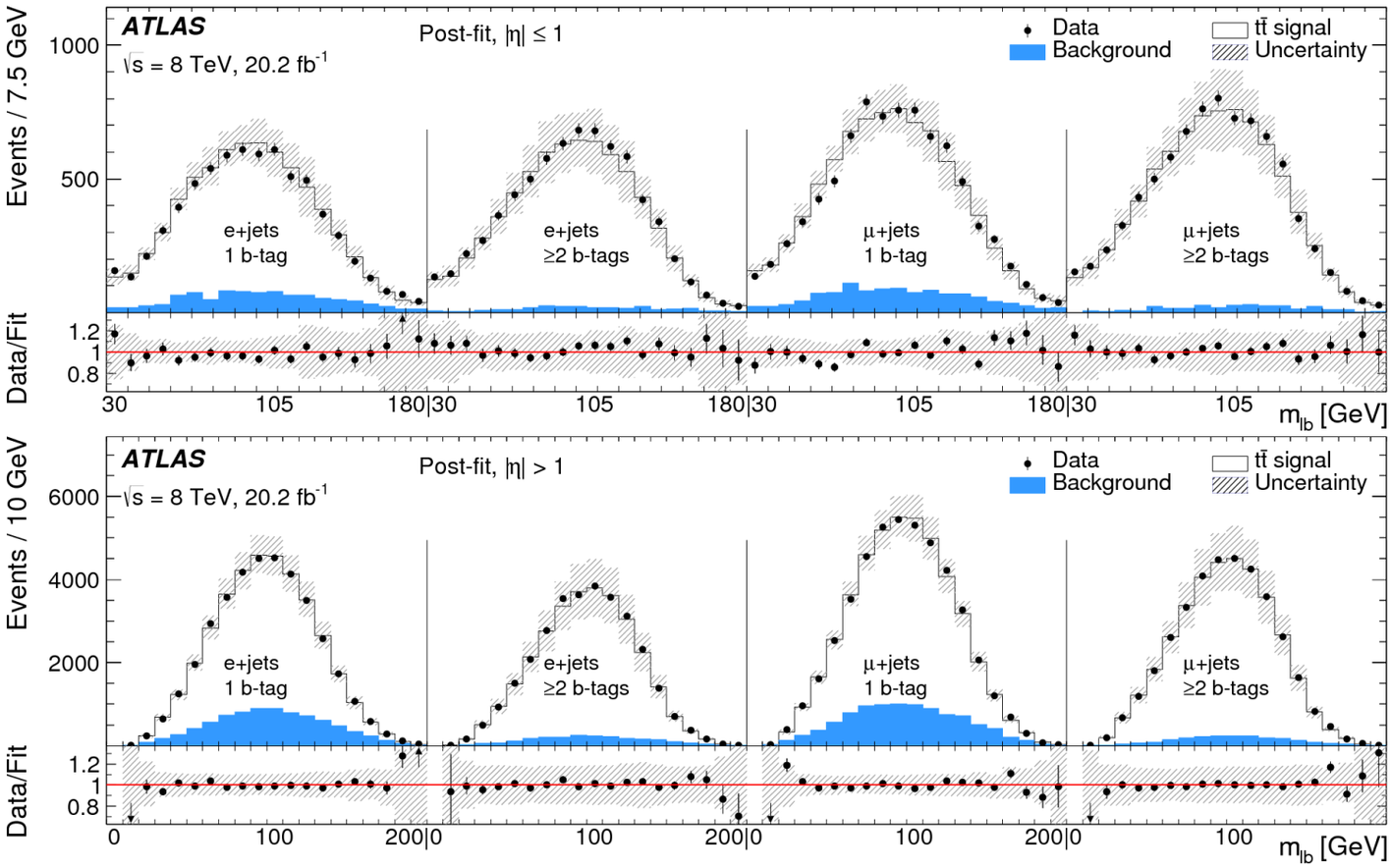

ATLAS
$m_W$ = 80.370 ± 0.019 GeV
$m_{top}$ = 172.69 ± 0.48 GeV
$m_H$ = 125.1 ± 0.2 GeV
68/95% CL of $m_W$ and $m_{top}$
68/95% CL of Electroweak Fit w/o $m_W$ and $m_{top}$
(Eur. Phys. J. C 78 (2018) 675)
$m_W$ [GeV]
$m_{top}$ [GeV]


ATLAS
∫ Ldt = 20.2 fb$^{-1}$
$\chi^2$ 1-σ Stat. Contour
$\chi^2$ 2-σ Stat. Contour
$F_{bkgd}$
$m_{top}$ [GeV]


ATLAS+CMS Preliminary
LHC*top*WG
$m_{top}$ summary, $\sqrt{s}$ = 7-13 TeV
November 2018
World comb. (Mar 2014) [2]
stat
total uncertainty
total stat
$m_{top}$ ± total (stat ± syst)
$\sqrt{s}$
Ref.
LHC comb. (Sep 2013) 173.29 ± 0.95 (0.35 ± 0.88) 7 TeV [1]
World comb. (Mar 2014) 173.34 ± 0.76 (0.36 ± 0.67) 1.96-7 TeV [2]
ATLAS, l+jets 172.33 ± 1.27 (0.75 ± 1.02) 7 TeV [3]
ATLAS, dilepton 173.79 ± 1.41 (0.54 ± 1.30) 7 TeV [3]
ATLAS, all jets 175.1 ± 1.8 (1.4 ± 1.2) 7 TeV [4]
ATLAS, single top 172.2 ± 2.1 (0.7 ± 2.0) 8 TeV [5]
ATLAS, dilepton 172.99 ± 0.85 (0.41 ± 0.74) 8 TeV [6]
ATLAS, all jets 173.72 ± 1.15 (0.55 ± 1.01) 8 TeV [7]
ATLAS, l+jets 172.08 ± 0.91 (0.39 ± 0.82) 8 TeV [8]
ATLAS comb. (Oct 2018) 172.69 ± 0.48 (0.25 ± 0.41) 7+8 TeV [8]
CMS, l+jets 173.49 ± 1.06 (0.43 ± 0.97) 7 TeV [9]
CMS, dilepton 172.50 ± 1.52 (0.43 ± 1.46) 7 TeV [10]
CMS, all jets 173.49 ± 1.41 (0.69 ± 1.23) 7 TeV [11]
CMS, l+jets 172.35 ± 0.51 (0.16 ± 0.48) 8 TeV [12]
CMS, dilepton 172.82 ± 1.23 (0.19 ± 1.22) 8 TeV [12]
CMS, all jets 172.32 ± 0.64 (0.25 ± 0.59) 8 TeV [12]
CMS, single top 172.95 ± 1.22 (0.77 ± 0.95) 8 TeV [13]
CMS comb. (Sep 2015) 172.44 ± 0.48 (0.13 ± 0.47) 7+8 TeV [12]
CMS, l+jets 172.25 ± 0.63 (0.08 ± 0.62) 13 TeV [14]
CMS, dilepton 172.33 ± 0.70 (0.14 ± 0.69) 13 TeV [15]
CMS, all jets 172.34 ± 0.79 (0.20 ± 0.76) 13 TeV [16]
$m_{top}$ [GeV]

Eur. Phys. J. C 78 (2018) 129

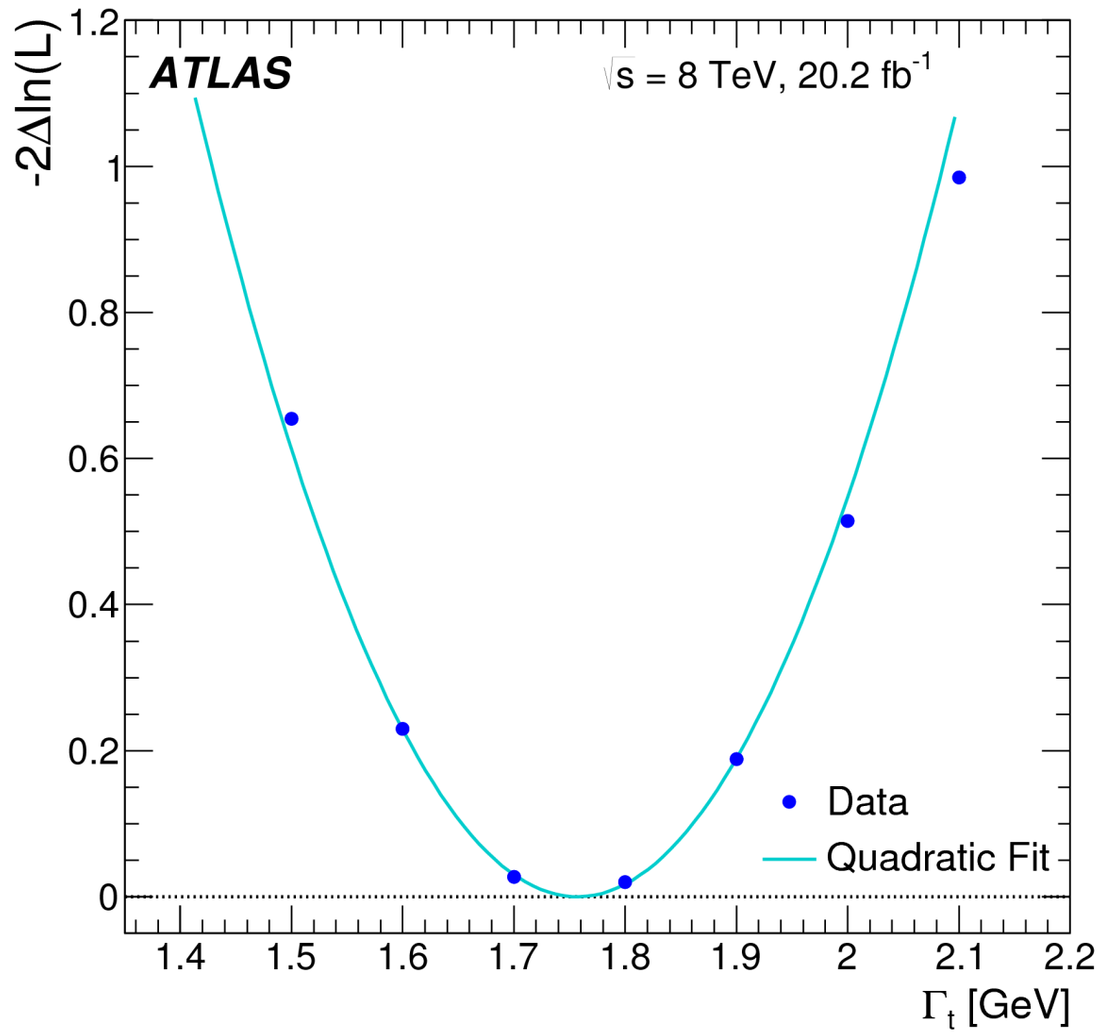
# Top Width




**Top width affects observable such as m($\ell$,b) and $\Delta R_{min}$(j,b)**

**Simultaneous fit of 16 observables in lepton+jets channel**

$$\Gamma_t = 1.76 \pm 0.33(\text{stat.})^{+0.79}_{-0.68}(\text{syst.})\ \text{GeV}$$



# Search for New Physics

**“Maybe the Nobel Prize should be awarded to the physicist who discovered no new particle this year?”**
**J. Robert Oppenheimer**

# You don’t discover a fundamental particle every year anymore

**“Hey mom, can you go to the public library?”**

*Un'équipe americana è riuscita ad isolare la particella più sfuggente dell'universo*

Scoperto il top-quark

di FRANCO PRATTICO

E' forse la rivincita della scienza americana, umiliata in questi anni dalla fisica europea, in particolare dalle scoperte effettuate al Cern (centro europeo di fisica nucleare) di Ginevra e dalla decisione del governo americano di non realizzare il gigantesco acceleratore di particelle SSC nel Texas. Secondo notizie filtrate nella comunità scientifica, e che verranno nei prossimi giorni confermate da un articolo sul *Physical Review Letter*, nel grande «collider» del Fermilab, a Chicago, nei giorni scorsi un'équipe di fisici americani sarebbe riuscita finalmente ad «acciuffare», sparando fasci di particelle e facendole scontrare tra di loro a energie altissime, il fantomatico «quark top», una inafferrabile particella indispensabile per completare il quadro della costituzione ultima della materia come noi la concepiamo.

La «caccia» durava da oltre vent'anni. Nei primi anni Sessanta il premio Nobel Murray Gell-Mann e, indipendentemente, George Zweig, per spiegare i comportamenti delle particelle che formano, tra l'altro, il nucleo dell'atoo (cioè protoni e neutroni, e in aggiunta a questi altre particelle pesanti rivelate dai raggi cosmici, i mesoni) e certe loro caratteristiche, avevano avanzato l'ipotesi che queste fossero a loro volta composte da altre particelle dotate di carica elettrica frazionaria (ognuna un terzo della carica unitaria, che com'è noto è positiva per il protone e negativa per l'elettrone, neutra invece per il neutrone). Era l'atto di nascita di una branca della fisica nucleare, la «cromodinamica», destinata appunto ad esplorare la struttura più intima della materia, la complicata geometria che spiega le proprietà e le caratteristiche dei «mattoni dell'universo». Le parti costituenti di protoni, neutroni e mesoni vennero da Gell-Mann battezzate «quark»: un termine tratto fantasiosamente dal *Finnegan's Wake* di James Joyce (la frase ispiratrice era «Three quarks for Muster Mark», una frase di difficile interpretazione, come appunto la struttura dei nucleoni).

Da quel momento nei grandi laboratori di fisica fondamentale di tutto il mondo partiva la «caccia» al quark: una caccia particolarmente difficile perchè, come spiega appunto la cromodinamica, i quark sono «legati», all'intern delle particelle che vengono a formare, da forze che aumentano proporzionalmente alla distanza: quanto più si cerca di «tirarle fuori», tanto maggiore la resistenza che oppongono. Ciò nonostante, nel corso degli ultimi lustri nei grandi laboratori di fisica si era riusciti a individuare e registrare indiscutibilmente le tracce di cinque dei sei quark che la teoria richiede: erano stati trovati a energie diverse i quark Up, Down (particolarmente importanti, perchè è con essi che la natura ha formato le particelle a noi più familiari, cioè protoni e

*L'America conferma quanto anticipato dagli scienziati italiani*

Preso il Top quark

di ARTURO ZAMPAGLIONE

New York - Da sempre l'uomo è andato alla ricerca dell'infinitesimamente piccolo. Esplorando quei labili confini tra filosofia e fisica, si è interrogato sulla natura della materia. E a due millenni e mezzo da Anassimandro e a centoquindici anni dalla nascita di Einstein, ha ora trovato l'ultimo pezzettino del «puzzle». Un team di quattrocentotrentanove scienziati internazionali ha infatti annunciato ieri di aver finalmente raggiunto le prove del «top quark»: anello mancante nella teoria della materia e dodicesimo quark, la cui esistenza era stata da tempo teorizzata, e anche in parte dimostrata dal premio Nobel Carlo Rubbia nel 1984, ma mai in modo inconfutabile. La scoperta - che *Repubblica* aveva già annunciato il 31 marzo scorso - è il risultato di una serie di esprimenti condotti nell'acceleratore di particelle, un tunnell sotterraneo di sei chilometri di diametro, del laboratorio intitolato a Enrico Fermi, a Batavia nell'Illinois. Qualcuno del team parla di risultato rivoluzionario.

Il premio Nobel Hans A. Bethe della Cornell University preferisce non tradire il cauto linguaggio degli accademici e parla di «passo avanti importantissimo»: «Perché - spiega - rende l'intera teoria della materia più credibile e più consolidata». La fisica aveva bisogno del «top quark», cioè il quark alto. Esso era già presente in ogni calcolo. Se non fosse stato trovato, l'intero «modello standard» prefigurato da un altro Nobel, Murray Gell-Mann, sarebbe crollato, gettando la scienza mondiale in una vera e propria crisi di identità. Invece adesso dal laboratorio Fermi è arrivata l'attesa conferma. Tutta la materia è fatta da atomi, considerati fino a un secolo fa l'unità più piccola della natura. Poi la fisica ha scoperto che anche gli atomi erano composti da particelle sub-atomiche come i protoni e i neutroni.

E queste stesse particelle - si è poi capito - erano fatte di elementi ancora più piccoli. Così è nata la teoria del quark, la particella elementare, finora ipotetica ma da ieri non più. Il nome quark è stato preso da Gell-Mann da James Joyce. I quark esistono in sei differenti versioni chiamate sapori: up, down, strano, incanto, alto («top») e basso; vi sono anche i sei corrispondenti antiquark. Dalle diverse combinazioni di questi dodici quark dovrebbe risultare tutta la materia. In aggiunta alla materia esistono poi nell'universo forze molto potenti come la gravità o l'elettromagnetismo. Cinque dei sei quark erano già stati trovati, il sesto mancava all'appello a dispetto di innumerevoli esperimenti condotti con l'acceleratore, visto che la possibilità di rivelare un quark allo stato libero è strettamente legata alla capacità di accelerare le particelle arrivando a una velocità vicina a quella della luce e facendole scontrare.

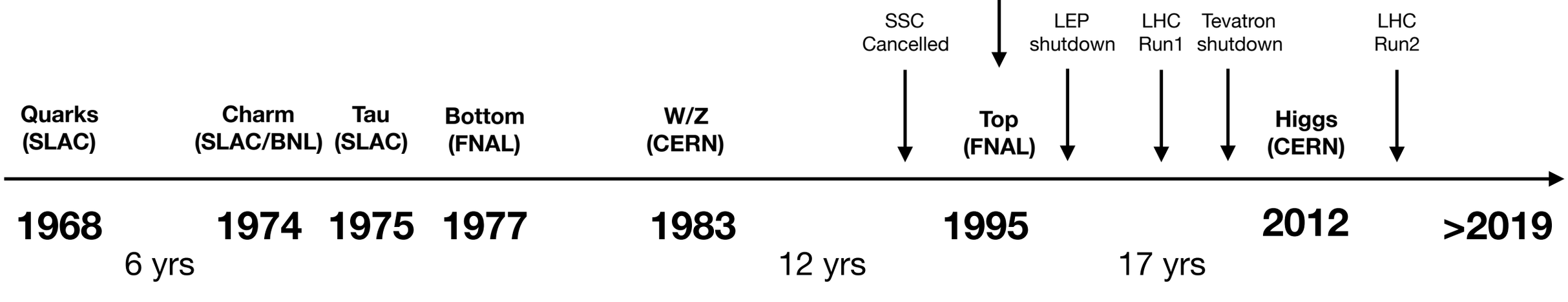


Carlo Rubbia

Parlando con il *New York Times*, che ieri ha anticipato la notizia del «top quark», gli scienziati del laboratorio Fermi hanno paragonato l'esperimento allo scontro in aria di due palle da tennis, dal quale - grazie a quella sorta di alchimia ipotizzata per primo da Albert Einstein con la famosa legge della equivalenza tra materia e energia - scaturisce una terza palla, molto più pesante, simile a una palla da bowling. Secondo Melvyn J. Shochet, professore di fisica all'università di Chicago e portavoce del team di scienziati del Laboratorio Fermi, la massa del «top quark» è stata calcolata in 174 miliardi di elettroni-volts, con una possibilità di errore di più o meno 17 miliardi. Il risultato dell'esperimento è descritto in un lungo articolo di centocinquanta pagine inviato alla più autorevole rivista mondiale del settore, *Physical review*.

Ed è stato reso pubblico ieri con una serie di comunicati in varie capitali, compresa Roma: perchè il team è veramente internazionale, vi fanno parte scienziati americani, italiani (quarantacinque, provenienti da Bologna, Padova, Pisa e dai laboratori di Frascati, guidati dal professor Bellettini dell'Istituto nazionale di fisica nucleare di Pisa), giapponesi, canadesi e di Taiwan. Già nel 1984 Rubbia, che era a capo di centocinquantuno fisici europei, aveva annunciato le prove della esistenza del «top quark». In seguito quella scoperta apparve prematura, perchè la particella era più pesante e più difficile da individuare rispetto alle previsioni.

Potrebbe succedere lo stesso con il risultato ottenuto al Laboratorio fermi? Dice Shochet: «Non c'è dubbio che ci sarà chi chiederà più esperimenti, più prove, e noi non potremo che dirci d'accordo». D'altra parte, tra i quattrocentotrenaove nipotini di Anassimandro e Einstein regnano l'entusiasmo e la convinzione che la materia sia diventata meno oscura.



# You don't discover a fundamental particle every year anymore

**"Hey mom, can you go to the public library?"**

*Un'équipe americana è riuscita ad isolare la particella più sfuggente dell'universo*

Scoperto il top-quark

di FRANCO PRATTICO

E' forse la rivincita della scienza americana, umiliata in questi anni dalla fisica europea, in particolare dalle scoperte effettuate al Cern (centro europeo di fisica nucleare) di Ginevra e dalla decisione del governo americano di non realizzare il gigantesco acceleratore di particelle SSC nel Texas. Secondo notizie filtrate nella comunità scientifica, e che verranno nei prossimi giorni confermate da un articolo sul *Physical Review Letter*, nel grande «collider» del Fermilab, a Chicago, nei giorni scorsi un'équipe di fisici americani sarebbe riuscita finalmente ad «acciuffare», sparando fasci di particelle e facendole scontrare tra di loro a energie altissime, il fantomatico «quark top», una inafferrabile particella indispensabile per completare il quadro della costituzione ultima della materia come noi la concepiamo.

La «caccia» durava da oltre vent'anni. Nei primi anni Sessanta il premio Nobel Murray Gell-Mann e, indipendentemente, George Zweig, per spiegare i comportamenti delle particelle che formano, tra l'altro, il nucleo dell'atoo (cioè protoni e neutroni, e in aggiunta a questi altre particelle pesanti rivelate dai raggi cosmici, i mesoni) e certe loro caratteristiche, avevano avanzato l'ipotesi che queste fossero a loro volta composte da altre particelle dotate di carica elettrica frazionaria (ognuna un terzo della carica unitaria, che com'è noto è positiva per il protone e negativa per l'elettrone, neutra invece per il neutrone). Era l'atto di nascita di una branca della fisica nucleare, la «cromodinamica», destinata appunto ad esplorare la struttura più intima della materia, la complicata geometria che spiega le proprietà e le caratteristiche dei «mattoni dell'universo». Le parti costituenti di protoni, neutroni e mesoni vennero da Gell-Mann battezzate «quark»: un termine tratto fantasiosamente dal *Finnegan's Wake* di James Joyce (la frase ispiratrice era «Three quarks for Muster Mark», una frase di difficile interpretazione, come appunto la struttura dei nucleoni).

Da quel momento nei grandi laboratori di fisica fondamentale di tutto il mondo partiva la «caccia» al quark: una caccia particolarmente difficile perchè, come spiega appunto la cromodinamica, i quark sono «legati», all'intern delle particelle che vengono a formare, da forze che aumentano proporzionalmente alla distanza: quanto più si cerca di «tirarle fuori», tanto maggiore la resistenza che oppongono. Ciò nonostante, nel corso degli ultimi lustri nei grandi laboratori di fisica si era riusciti a individuare e registrare indiscutibilmente le tracce di cinque dei sei quark che la teoria richiede: erano stati trovati a energie diverse i quark Up, Down (particolarmente importanti, perchè è con essi che la natura ha formato le particelle a noi più familiari, cioè protoni e

*L'America conferma quanto anticipato dagli scienziati italiani*

Preso il Top quark

di ARTURO ZAMPAGLIONE

New York - Da sempre l'uomo è andato alla ricerca dell'infinitesimamente piccolo. Esplorando quei labili confini tra filosofia e fisica, si è interrogato sulla natura della materia. E a due millenni e mezzo da Anassimandro e a centoquindici anni dalla nascita di Einstein, ha ora trovato l'ultimo pezzettino del «puzzle». Un team di quattrocentotrentanove scienziati internazionali ha infatti annunciato ieri di aver finalmente raggiunto le prove del «top quark»: anello mancante nella teoria della materia e dodicesimo quark, la cui esistenza era stata da tempo teorizzata, e anche in parte dimostrata dal premio Nobel Carlo Rubbia nel 1984, ma mai in modo inconfutabile. La scoperta - che *Repubblica* aveva già annunciato il 31 marzo scorso - è il risultato di una serie di esprimenti condotti nell'acceleratore di particelle, un tunnell sotterraneo di sei chilometri di diametro, del laboratorio intitolato a Enrico Fermi, a Batavia nell'Illinois. Qualcuno del team parla di risultato rivoluzionario.

Il premio Nobel Hans A. Bethe della Cornell University preferisce non tradire il cauto linguaggio degli accademici e parla di «passo avanti importantissimo»: «Perché - spiega - rende l'intera teoria della materia più credibile e più consolidata». La fisica aveva bisogno del «top quark», cioè il quark alto. Esso era già presente in ogni calcolo. Se non fosse stato trovato, l'intero «modello standard» prefigurato da un altro Nobel, Murray Gell-Mann, sarebbe crollato, gettando la scienza mondiale in una vera e propria crisi di identità. Invece adesso dal laboratorio Fermi è arrivata l'attesa conferma. Tutta la materia è fatta da atomi, considerati fino a un secolo fa l'unità più piccola della natura. Poi la fisica ha scoperto che anche gli atomi erano composti da particelle sub-atomiche come i protoni e i neutroni.

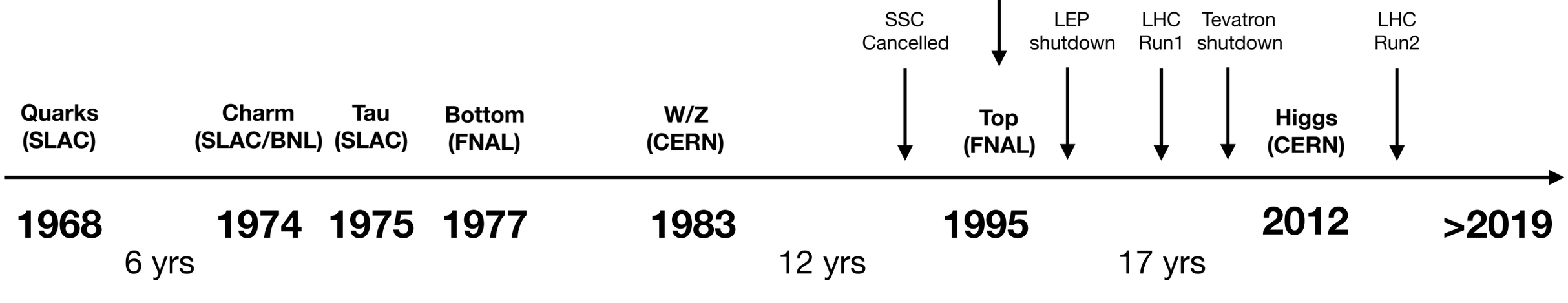
E queste stesse particelle - si è poi capito - erano fatte di elementi ancora più piccoli. Così è nata la teoria del quark, la particella elementare, finora ipotetica ma da ieri non più. Il nome quark è stato preso da Gell-Mann da James Joyce. I quark esistono in sei differenti versioni chiamate sapori: up, down, strano, incanto, alto («top») e basso; vi sono anche i sei corrispondenti antiquark. Dalle diverse combinazioni di questi dodici quark dovrebbe risultare tutta la materia. In aggiunta alla materia esistono poi nell'universo forze molto potenti come la gravità o l'elettromagnetismo. Cinque dei sei quark erano già stati trovati, il sesto mancava all'appello a dispetto di innumerevoli esperimenti condotti con l'acceleratore, visto che la possibilità di rivelare un quark allo stato libero è strettamente legata alla capacità di accelerare le particelle arrivando a una velocità vicina a quella della luce e facendole scontrare.

Carlo Rubbia

Parlando con il *New York Times*, che ieri ha anticipato la notizia del «top quark», gli scienziati del laboratorio Fermi hanno paragonato l'esperimento allo scontro in aria di due palle da tennis, dal quale - grazie a quella sorta di alchimia ipotizzata per primo da Albert Einstein con la famosa legge della equivalenza tra materia e energia - scaturisce una terza palla, molto più pesante, simile a una palla da bowling. Secondo Melvyn J. Shochet, professore di fisica all'università di Chicago e portavoce del team di scienziati del Laboratorio Fermi, la massa del «top quark» è stata calcolata in 174 miliardi di elettroni-volts, con una possibilità di errore di più o meno 17 miliardi. Il risultato dell'esperimento è descritto in un lungo articolo di centocinquanta pagine inviato alla più autorevole rivista mondiale del settore, *Physical review*.

Ed è stato reso pubblico ieri con una serie di comunicati in varie capitali, compresa Roma: perché il team è veramente internazionale, vi fanno parte scienziati americani, italiani (quarantacinque, provenienti da Bologna, Padova, Pisa e dai laboratori di Frascati, guidati dal professor Bellettini dell'Istituto nazionale di fisica nucleare di Pisa), giapponesi, canadesi e di Taiwan. Già nel 1984 Rubbia, che era a capo di centocinquantuno fisici europei, aveva annunciato le prove della esistenza del «top quark». Le cose quella scoperta appa ra, perché la particel sante e più difficile da rispetto alle previsio Potrebbe succede con il risultato ottenu torio fermi? Dice Sh c'è dubbio che ci sarà più esperimenti, più non potremo d'accordo». D'altra quattrocentotrenaov Anassimandro e Ei no l'entusiasmo e la che la materia sia di oscura.

**Next particle: A fermion (sterile ν?) discovered at FNAL in year ~2035**

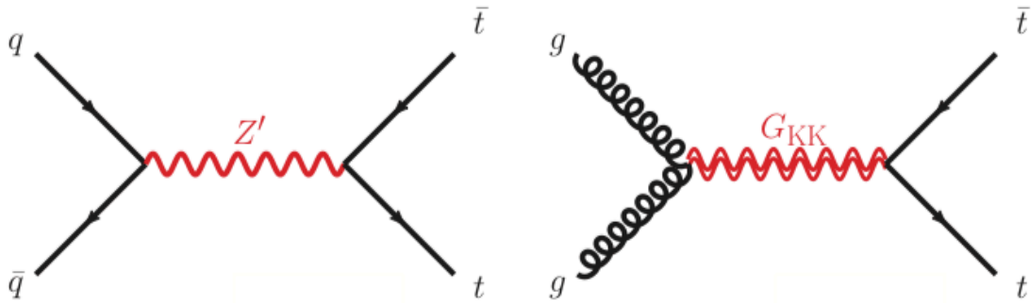


# X→tt Resonances

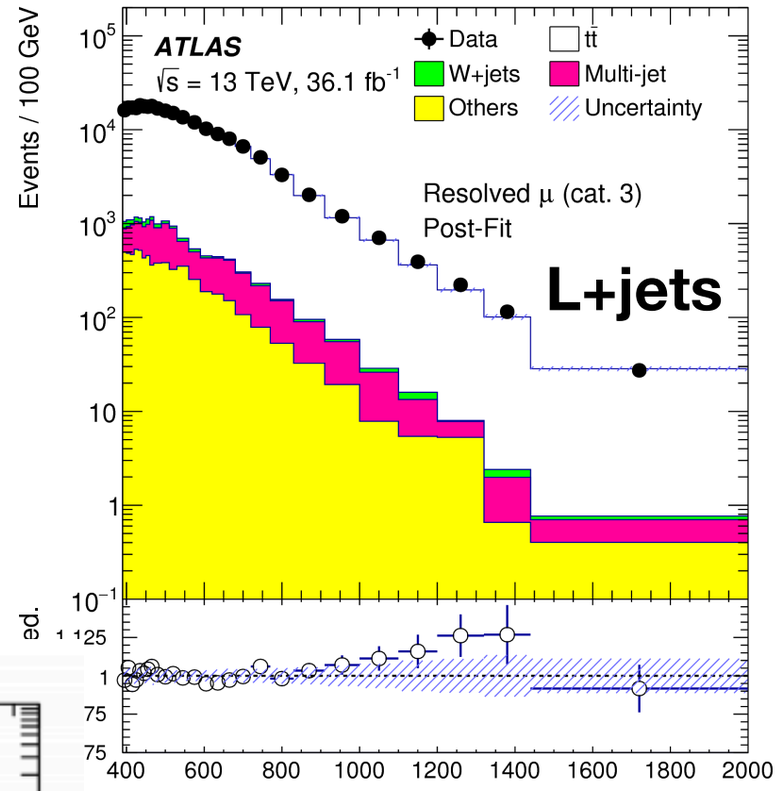
arXiv:1804.10823

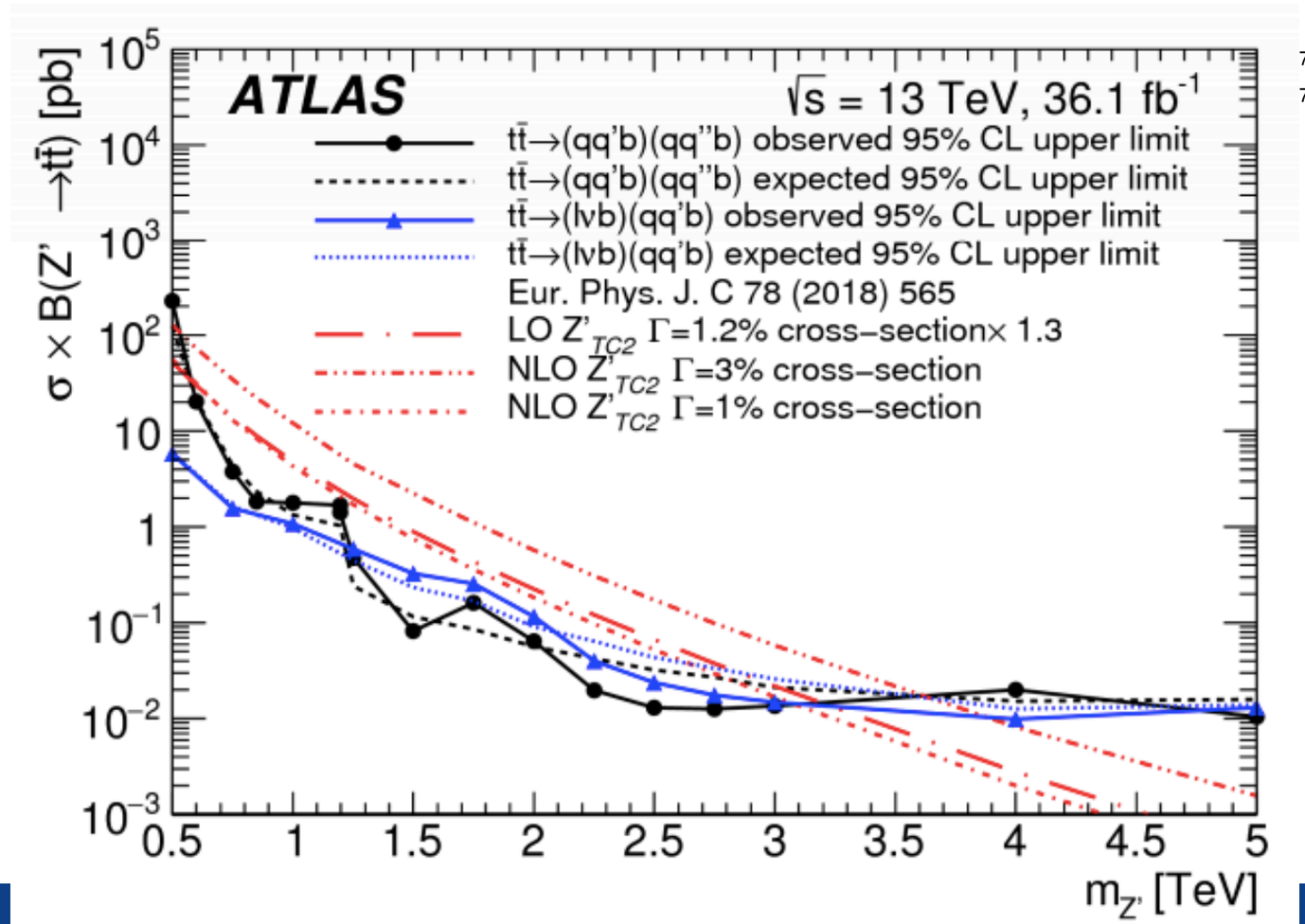
**Look for bumps in $t\bar{t}$ invariant mass:**

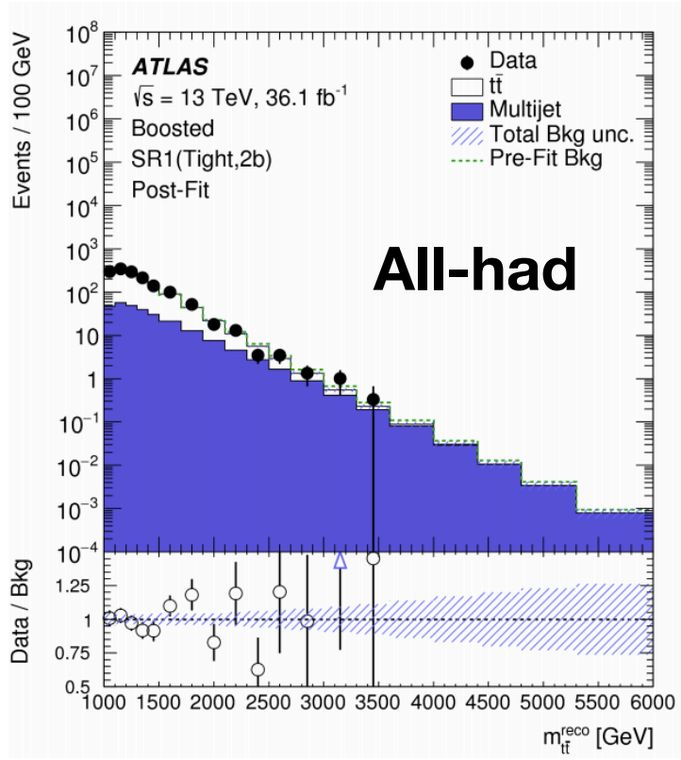
**Narrow resonance** **Broad resonance**




(a) $Z' \to t\bar{t}$ (b) $G_{KK} \to t\bar{t}$

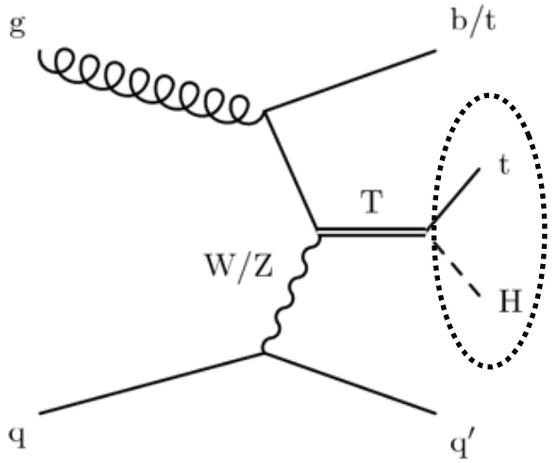


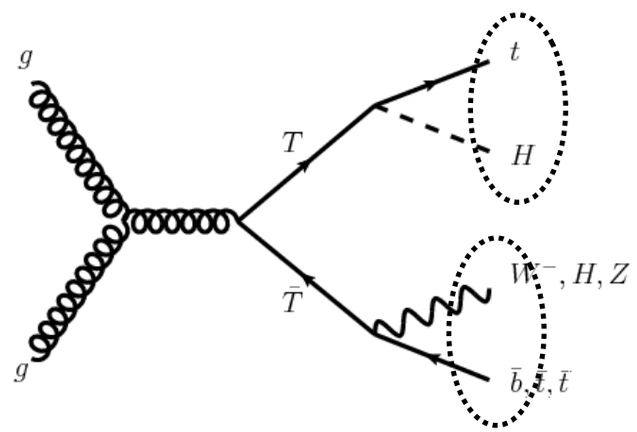



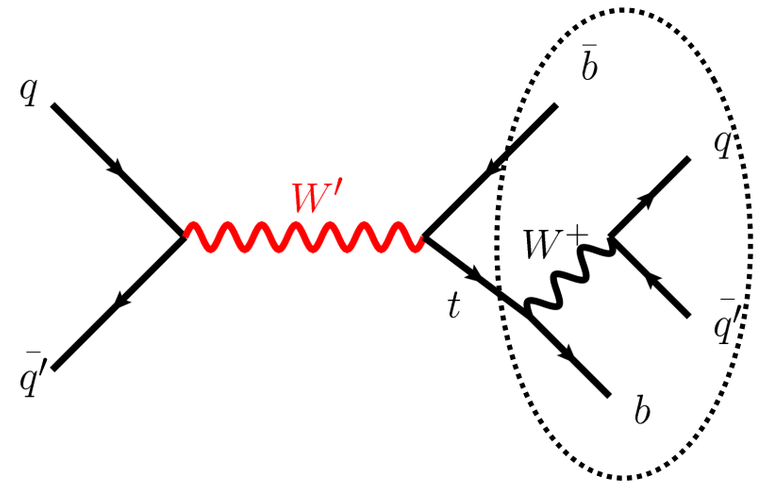



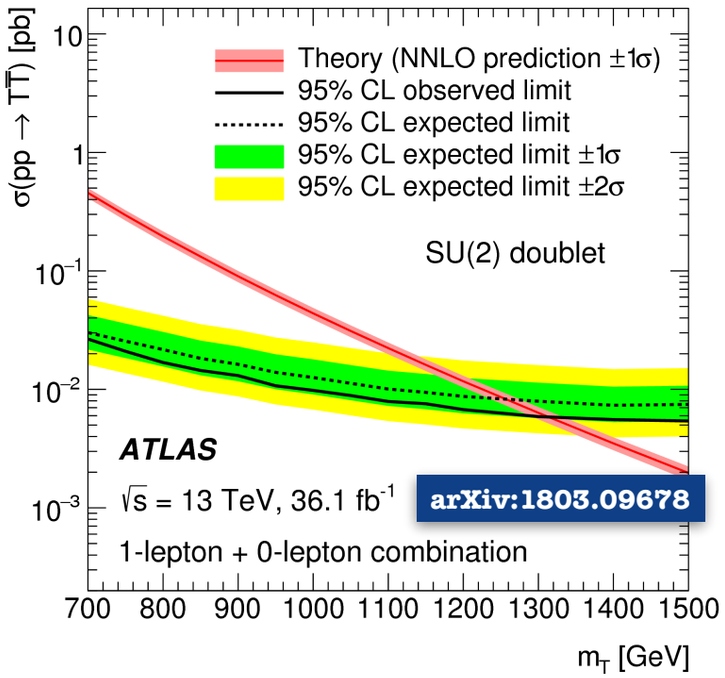
# X→tb,TZ,tH Resonances

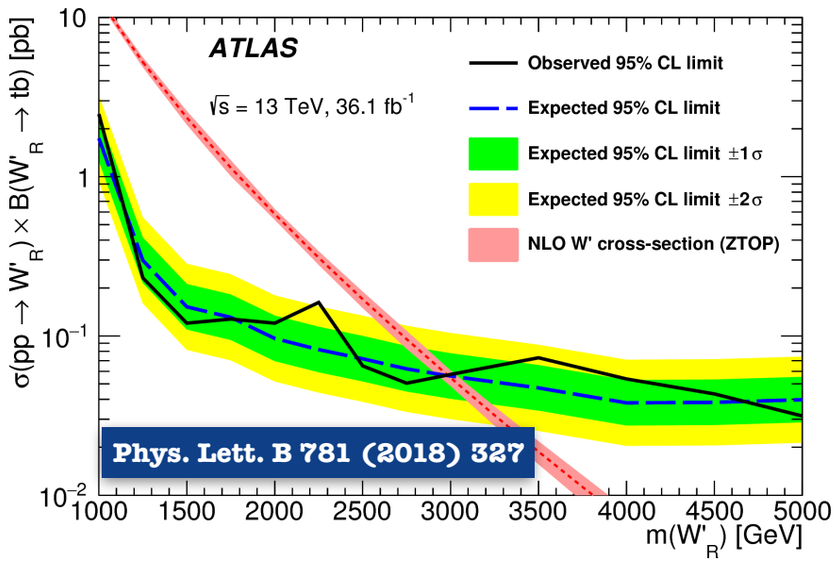
- Look for bumps in (t,b) or (t,H) invariant mass spectrum
- **Vector-Like Quarks (VLQ)**: quarks with vector-like interactions with other particles.
- **W'$_R$** and **W'$_L$**: additional gauge bosons, mediator of a new charged vector current



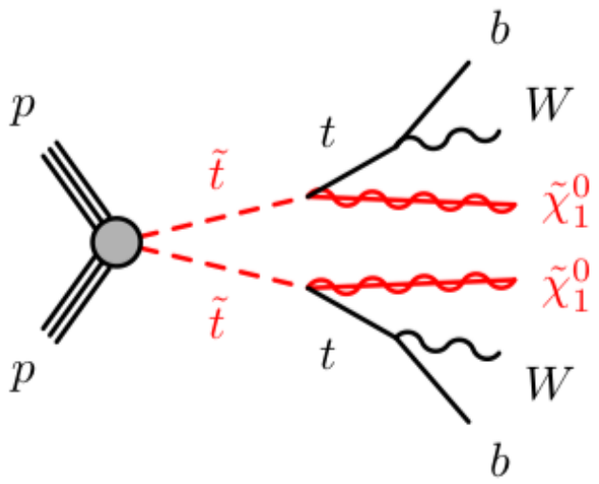



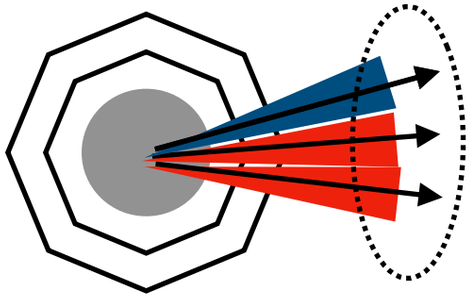



JHEP 12(2017)085

# Supersymmetric Scalar Tops

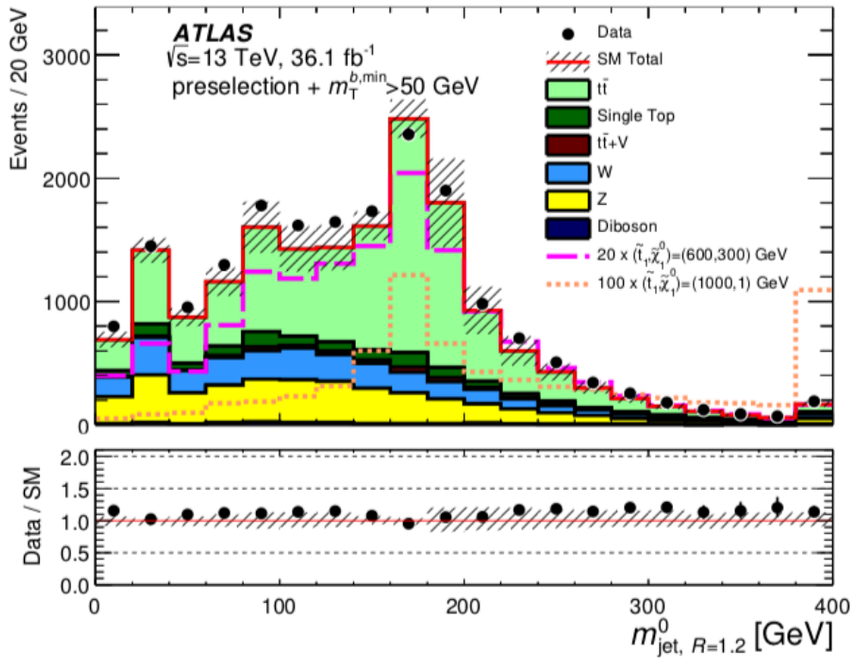


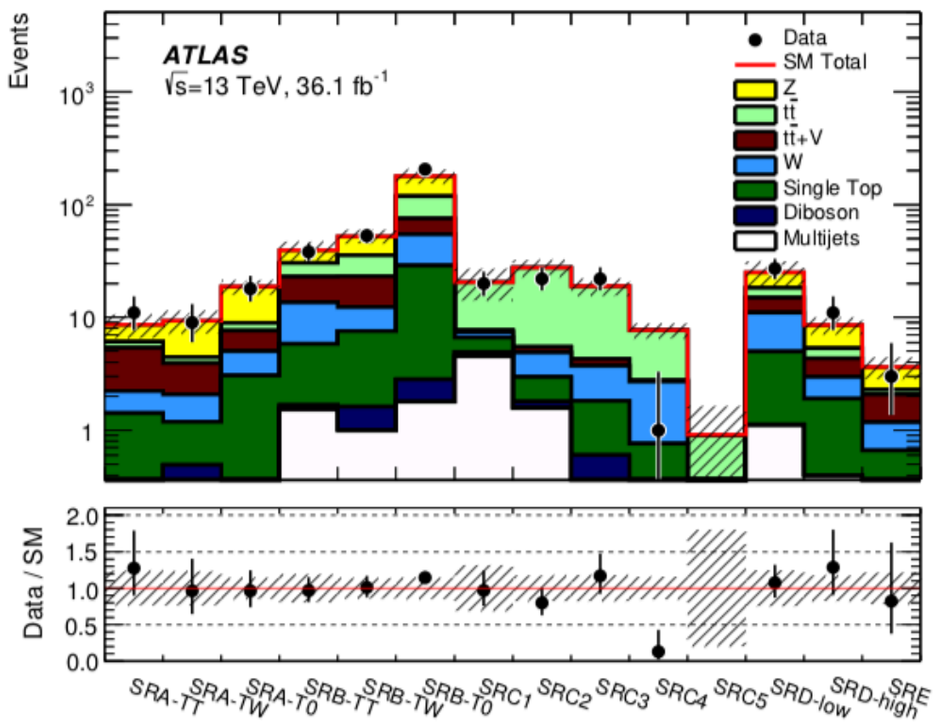

(a) $\tilde{t}_1 \to t^{(*)}\tilde{\chi}_1^0$



**Reclustered R=1.2 jet**

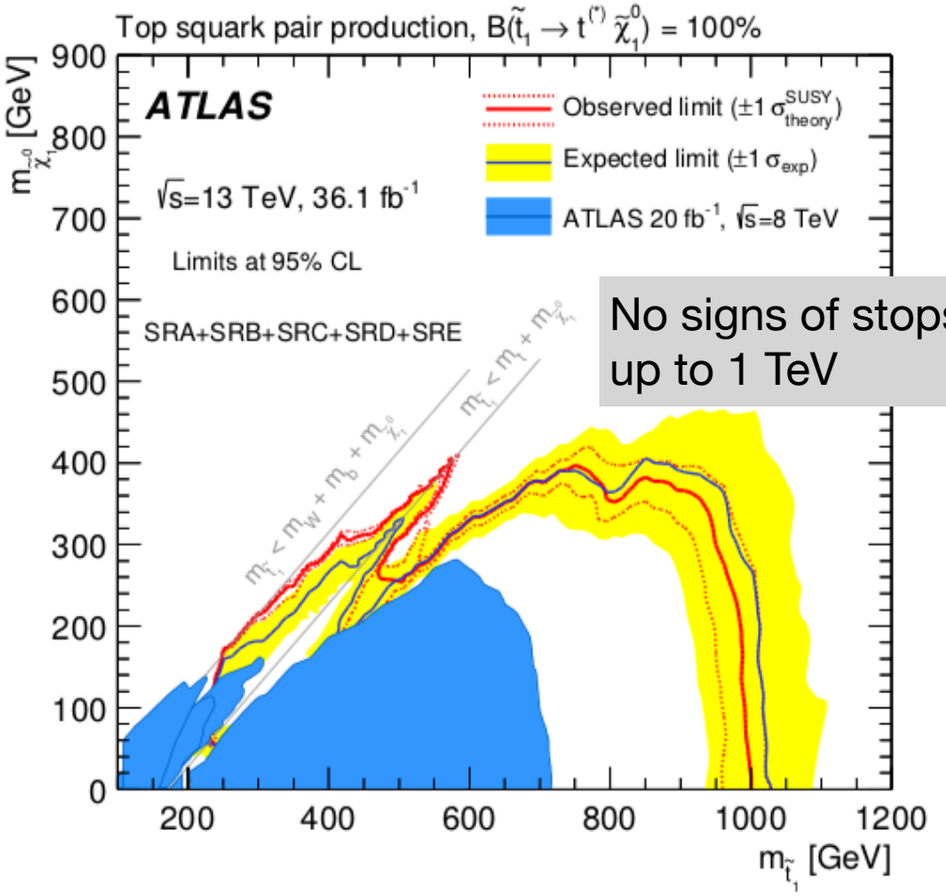
heavy stops almost produced at rest,
low momentum → unusually large jet radius




Signal xs depends on stop and neutralino masses

Set limits using simplified models

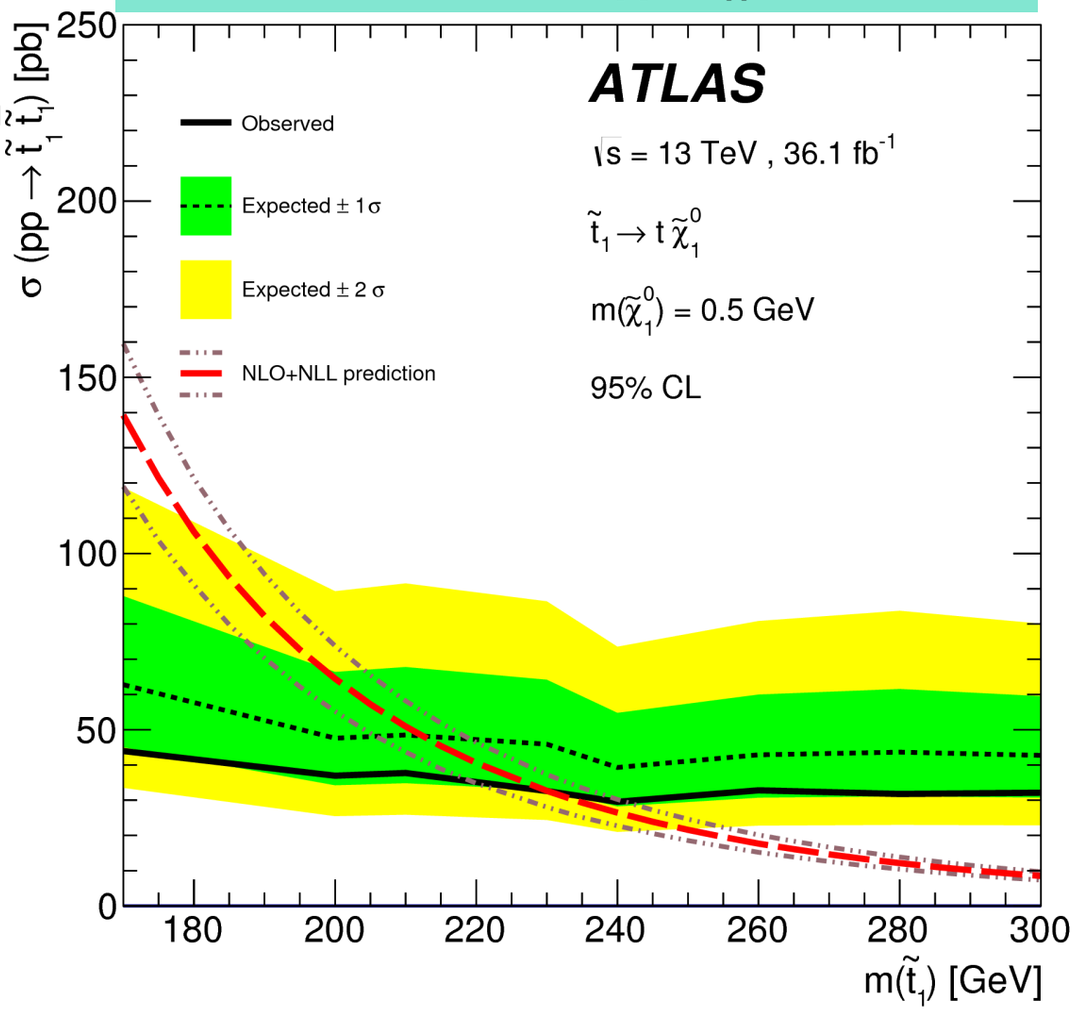



No signs of stops up to 1 TeV

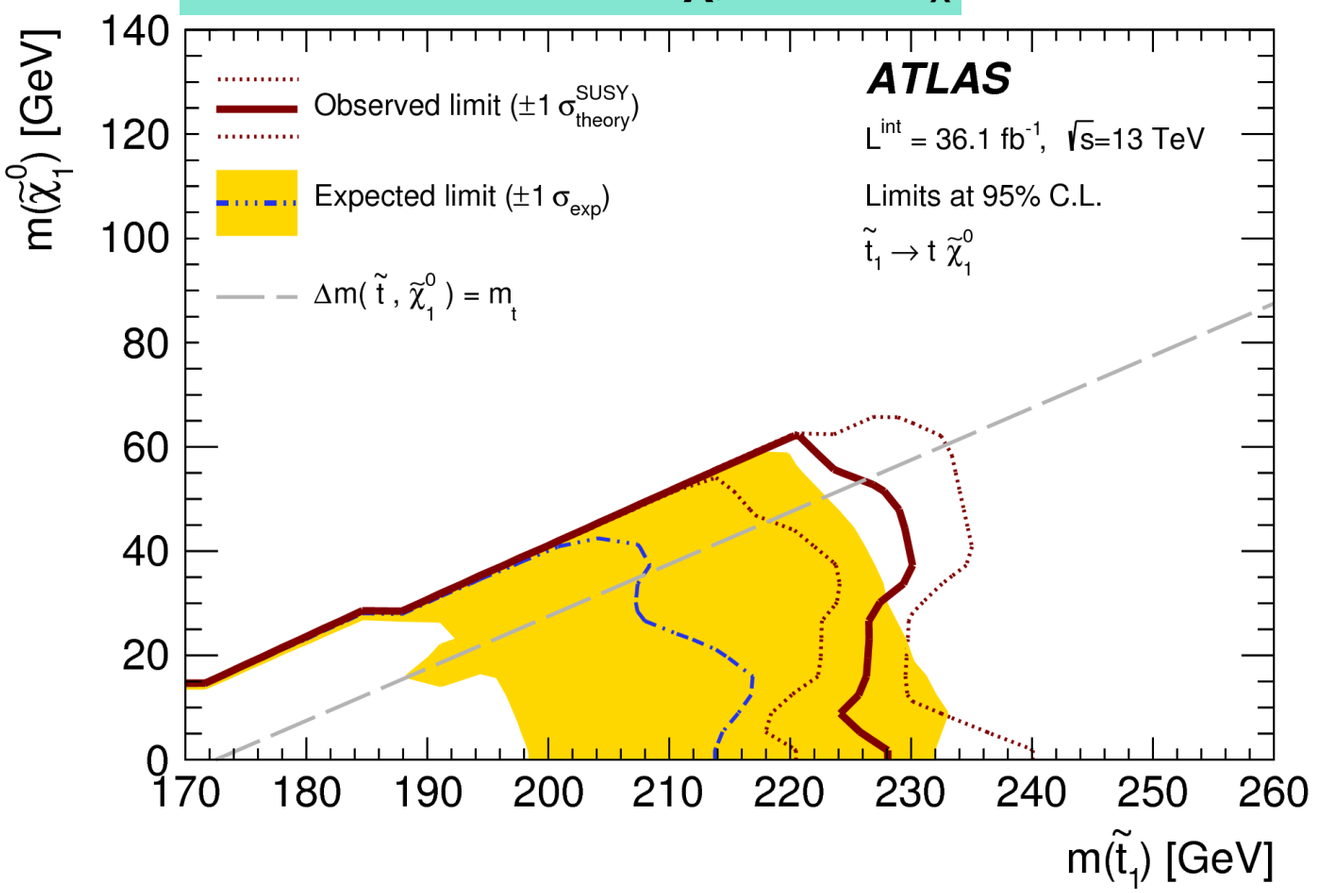
arXiv:1903.07570

# Stops from Spin Correlations

Assume 100% $\tilde{t} \rightarrow t\tilde{\chi}$, $m_{\tilde{\chi}}$ = 500 GeV




Assume 100% $\tilde{t} \rightarrow t\tilde{\chi}$, scan $m_{\tilde{\chi}}$




**“Searches never stop”**

arXiv:1903.07570

# S … s

Assu…

$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ production, $\tilde{t}_1 \to b\,f\,f'\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to c\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to W\,b\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to t\,\tilde{\chi}_1^0$ — May 2018

**ATLAS** Preliminary

$\sqrt{s}$=13 TeV, 36.1 fb$^{-1}$

$\tilde{t}_1 \to t\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to W\,b\,\tilde{\chi}_1^0$

$\tilde{t}_1 \to t\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to W\,b\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to b\,f\,f'\,\tilde{\chi}_1^0$

$\tilde{t}_1 \to t\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to W\,b\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to b\,f\,f'\,\tilde{\chi}_1^0$

$\tilde{t}_1 \to c\,\tilde{\chi}_1^0$ / $\tilde{t}_1 \to b\,f\,f'\,\tilde{\chi}_1^0$

$\tilde{t}_1 \to c\,\tilde{\chi}_1^0$

$\sqrt{s}$=8 TeV, 20 fb$^{-1}$

| | |
|---|---|
| 0L | [1709.04183] |
| 1L | [1711.11520] |
| 2L | [1708.03247] |
| Monojet | [1711.03301] |
| c0L | [1805.01649] |
| Run 1 | [1506.08616] |

Observed limits ···· Expected limits All limits at 95% CL

$m(\tilde{\chi}_1^0)$ [GeV]

$\Delta m(\tilde{t}_1, \tilde{\chi}_1^0) < 0$

$\Delta m(\tilde{t}_1, \tilde{\chi}_1^0) < m_b$

$\Delta m(\tilde{t}_1, \tilde{\chi}_1^0) < m_W + m_b$

$c\,\tilde{\chi}_1^0$

$b\,f\,f'\,\tilde{\chi}_1^0$

$W\,b\,\tilde{\chi}_1^0$

$m(\tilde{t}_1)$ [GeV]

**“Top corridor”**

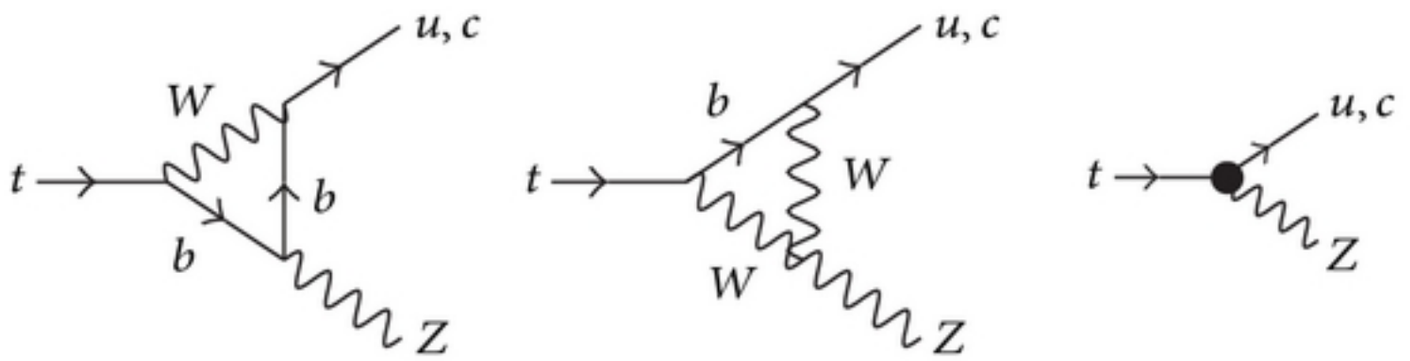
**Very difficult with direct search!**

$\sigma$ ($pp \to \tilde{t}_1\tilde{t}_1$) [pb]

[GeV]

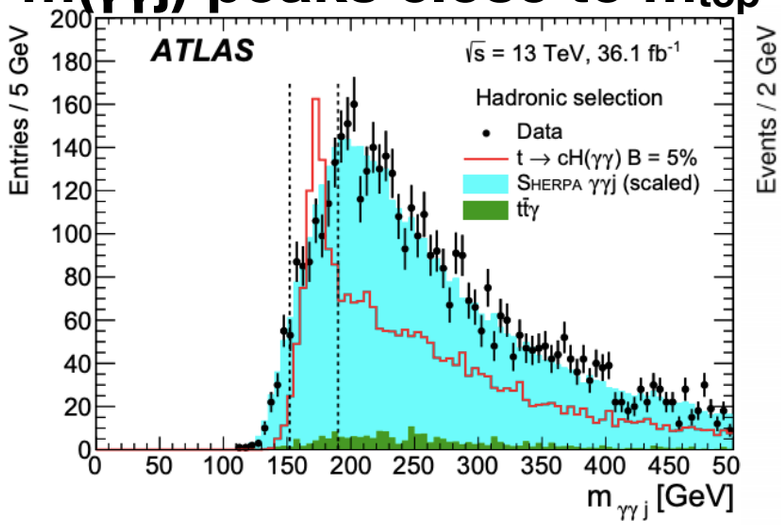
arXiv:1812.11568

# FCNC

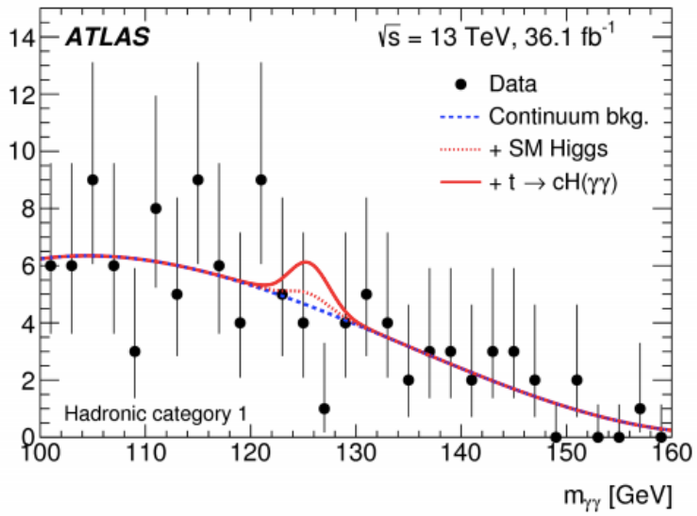


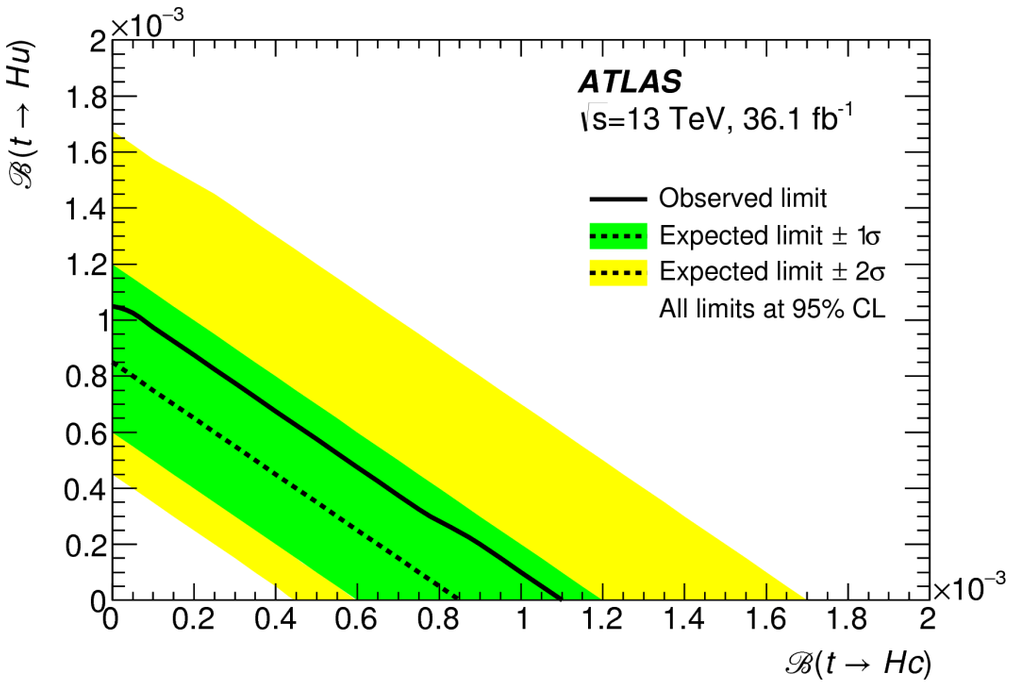

- Flavour-changing neutral currents strongly suppressed in the SM, but enhanced in some BSM scenarios
- Look for tt→WbHq (W→qq/ℓν,H→γγ/bb)

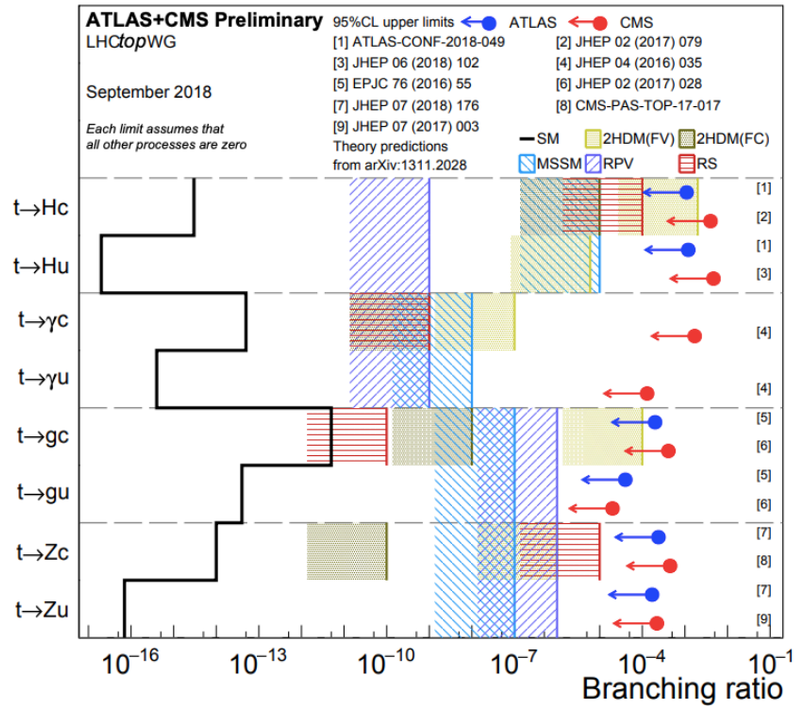
**m(γγj) peaks close to $m_{top}$**




**No Higgs peak**



# Conclusions

- A journey of thousands miles begins with a single step. Current ATLAS top analyses ≤ **36 fb$^{-1}$** prepared the stage for full Run2 measurements

- Tensions in top pT and Spin Correlations not yet completely understood, NNLO(QCD)+NLO(EW) corrections matter

- ATLAS baseline **POWHEG + Pythia8** globally good, but underwent significant tuning compared to other generators

- Hard-scattering and parton-shower **modelling** still a big source of **systematic** uncertainty limiting top measurements and searches

  - Tick-tock approach to reduce modelling systematics works!

  - Run1 measurements used to improve PDFs

# Backup