



# Il quark top a CMS

IFAE 2015

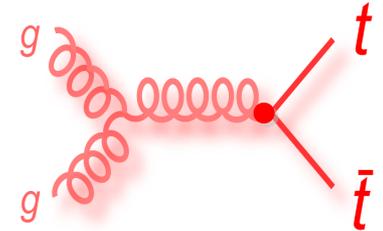
Università di Roma Tor Vergata, 08/04/2015

Alberto Orso Maria Iorio,  
Per la collaborazione CMS

# Che possiamo chiedere al top?

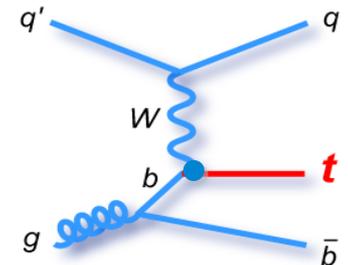
- **Per le interazioni fondamentali:**

- **Forza delle interazioni** via le sezioni d'urto:  **$\alpha_s$**  e  **$V_{tb}$**
- Via i decadimenti in entrambi  **$t\bar{t}$**  and **single top**
- Ricerca inclusiva di deviazioni con accoppiamenti anomali/FCNC

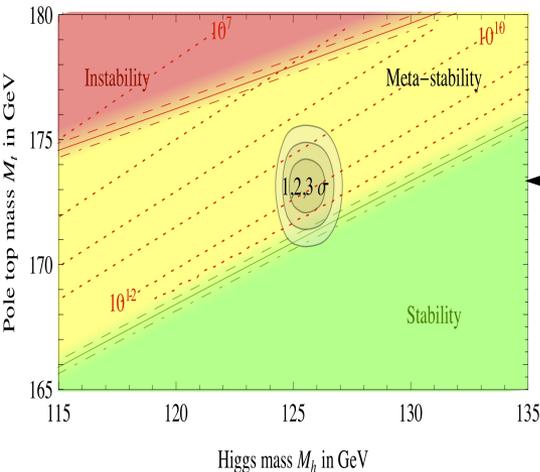


- **Proprietà del quark top e delle sue interazioni:**

- vertice  $tWb$  in produzione e/o decadimento: polarizzazione del top, elicità della  $W$ , violazione di CP...
- asimmetrie nella produzione di quark top



# Che possiamo chiedere al top?

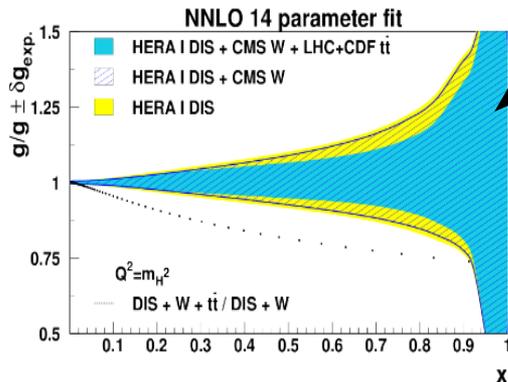


- **Massa del quark top:**

- Parametro fondamentale del modello standard
- Run2 ci dà la possibilità di misurarlo con la massima precisione che raggiungeremo per molti anni...

- **SM modeling:**

- input per le misure di PDF e i parametri del PS
- distribuzioni differenziali permettono confronti precisi con i vari generatori ME

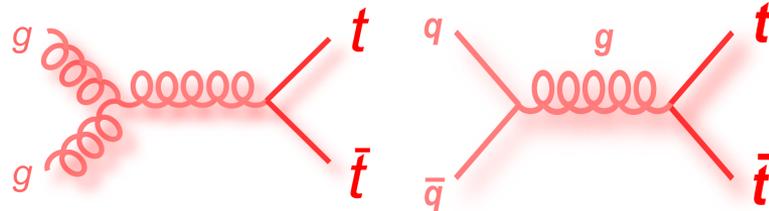


- **Non dimentichiamo che il primo passo per scoprire segnali di fisica BSM è misurare con precisione lo SM!!!**

# Meccanismi di produzione

Coppie tt

$LO \propto (\alpha_s/m_{top})^2$



~85%

~15%

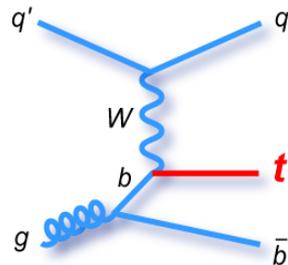
@7 TeV  
@8 TeV  
@13 TeV

17,20±4.8 pb  
245.8±9.6 pb  
832 ± 48 pb

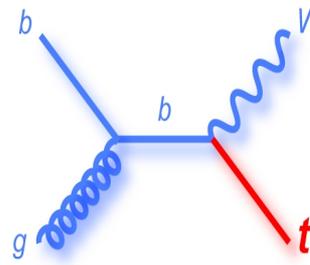
top singoli

$LO \propto (\alpha^*|V_{tb}|)^2$

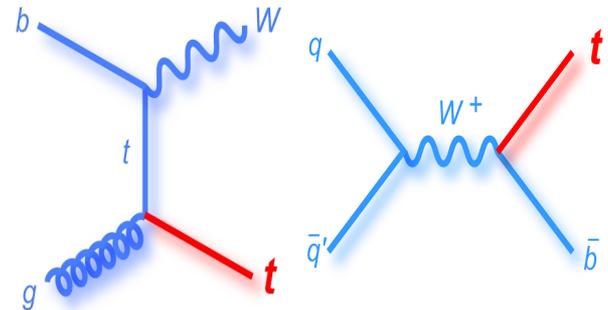
t-channel



W-associated (tW)



s-channel



@7 TeV  
@8 TeV  
@13 TeV

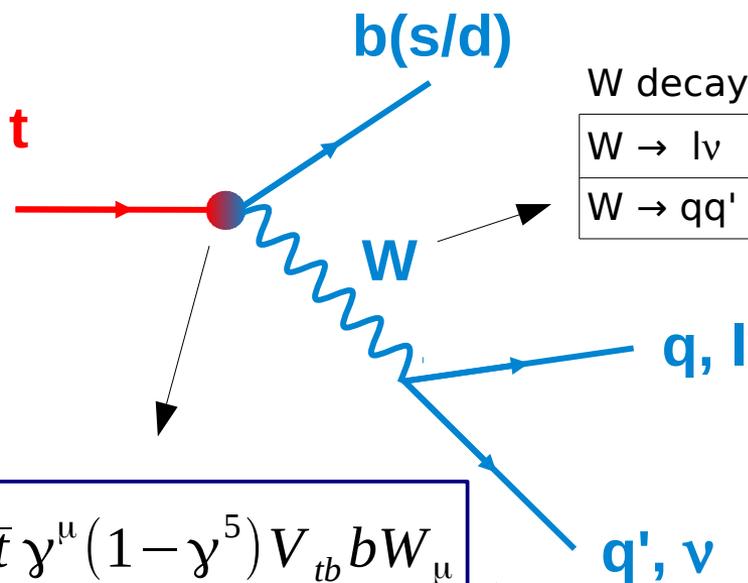
63.9±2.8 pb  
84.7±3.6 pb  
217.0±8.6pb

15.7±1.2 pb  
22.2±1.5 pb  
71.2±3.8 pb

4.63±0.19 pb  
5.55±0.22 pb  
11.36±0.46pb

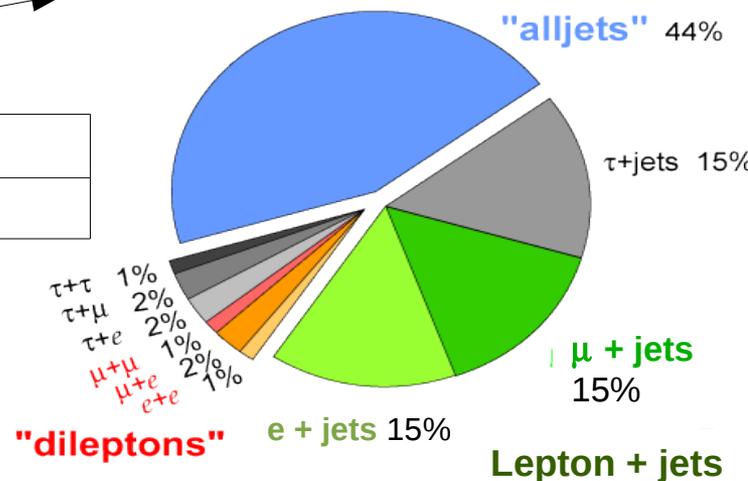
# Decadimenti del top

## ◦ Meccanismo elettrodebole:



W decay:	BR:
$W \rightarrow l\nu$	0.32
$W \rightarrow qq'$	0.68

## Top Pair Branching Fractions



$$\frac{-ig}{2\sqrt{2}} \bar{t} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) V_{tb} b W_\mu$$

## ◦ Vertice elettrodebole $tWb$ :

- V-A: **polarizzazione** visibile nei prodotti di decadimento
- Elemento della CKM  $|V_{tb}| \sim 1 \rightarrow \Gamma(t \rightarrow b) \gg \Gamma(t \rightarrow s, d)$

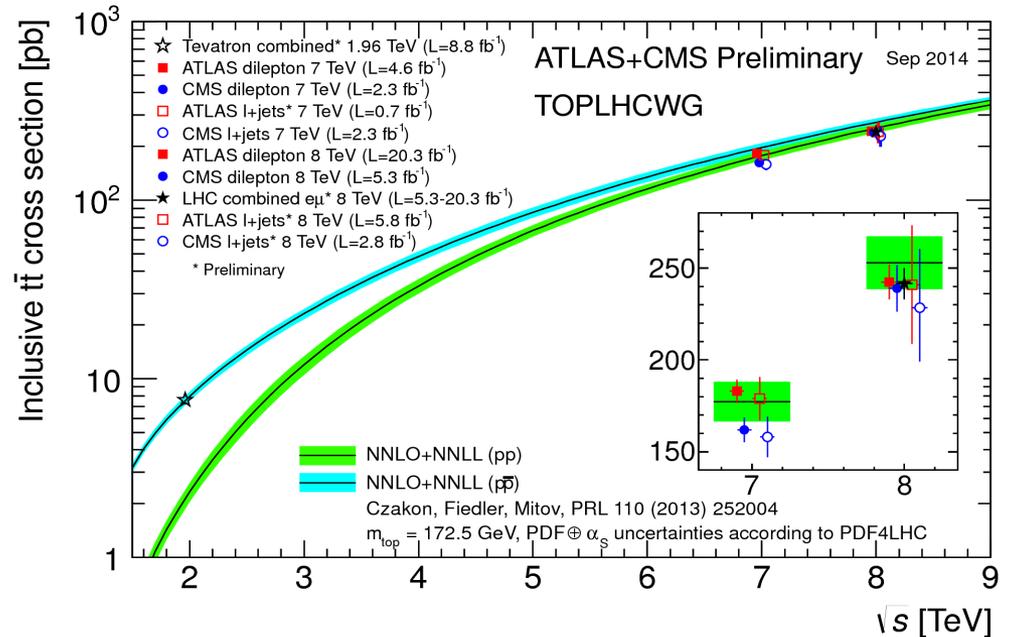
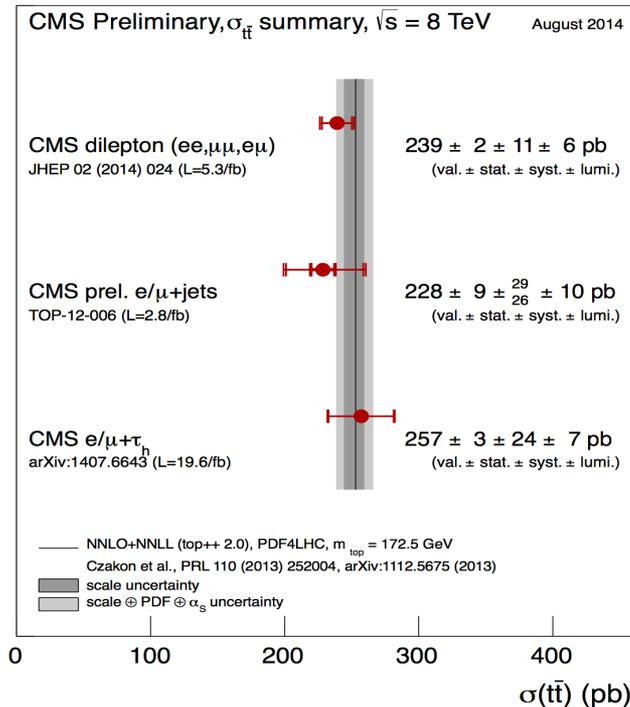
$1/m_{toq}$  produzione <  $1/\Gamma_t$  tempo di vita <  $1/\Lambda$  adronizzazione <  $m_t/\Lambda^2$  spin decorrelation

# Sezioni d'urto $t\bar{t}$ bar: $\alpha_s$ , mt, pdf...

# Sezione d'urto tt @7,8 TeV

## Sezione d'urto tt:

- Fondi principali: **W/Z+jets, QCD**
- Contributo dominante gg : rapporto S/B migliora con l'energia!



- Precisione delle misure : maggiore delle previsioni NLO, comparabile con la previsione NNLO
- **Misura più precisa a 7 ed 8 TeV nel canale e+mu:** quasi background free!

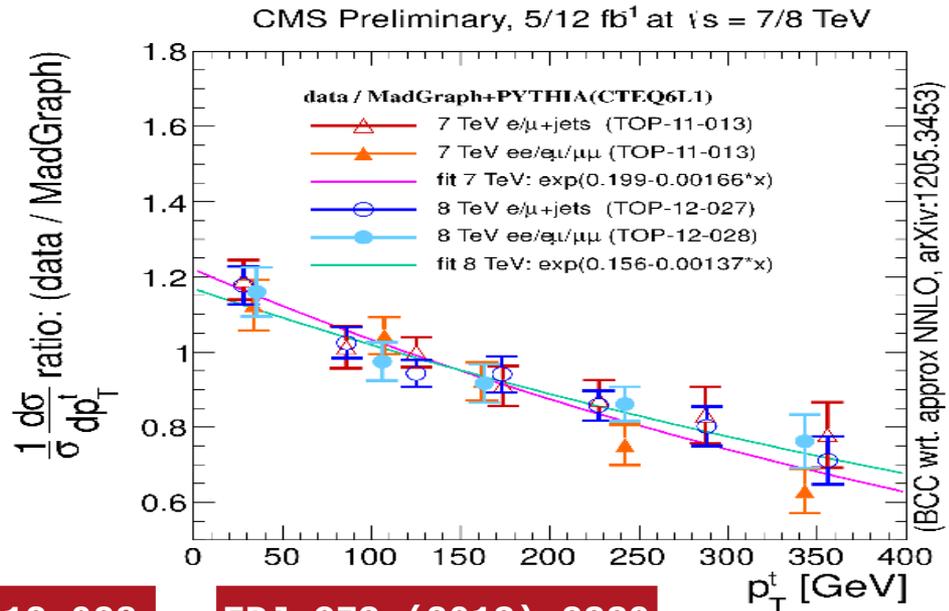
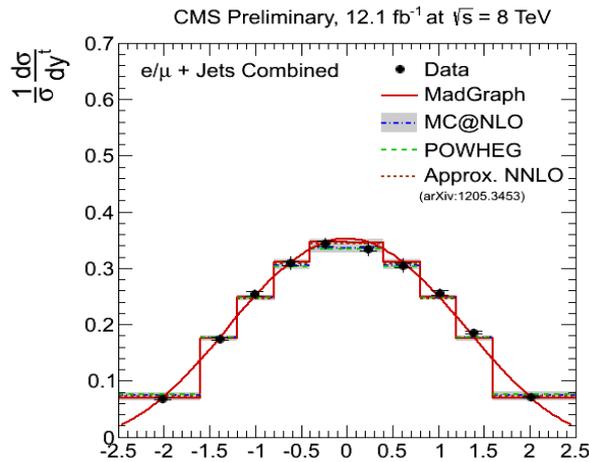
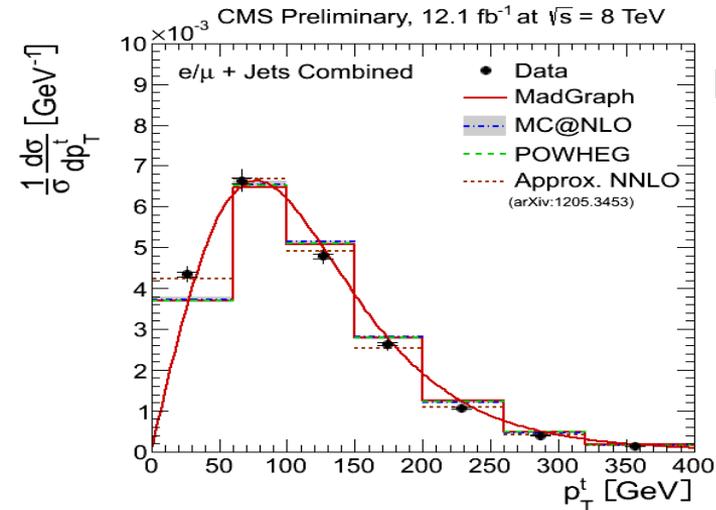
Vedi anche:

**CMS Top summary page**

# Sezione d'urto differenziale tt

## Misure differenziali :

- **Studio di discrepanze nel modeling:** spettri in  $p_T$ ,  $\eta$ , etc...
- **Esempio:** procedura per correggere la discrepanza nello spettro individuale del  $p_T$  del top



CMS PAS TOP-12-027

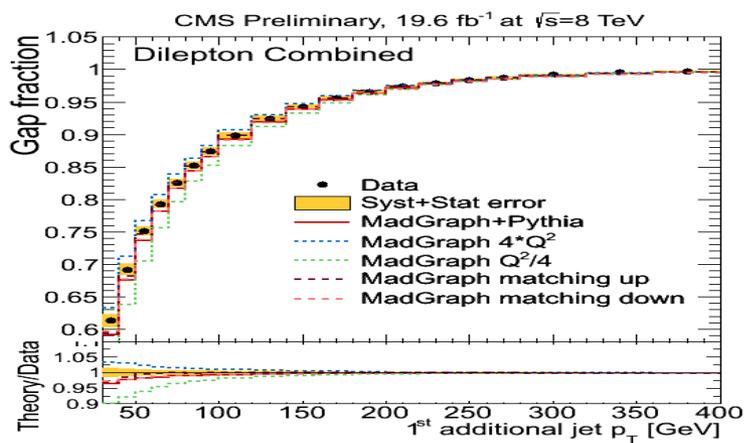
CMS PAS TOP-12-028

EPJ C73 (2013) 2339

# Misure differenziali di $t\bar{t}$ + jets

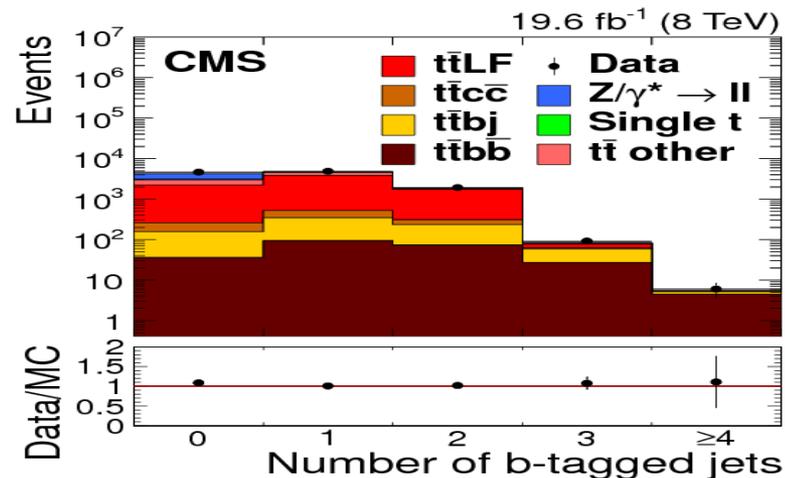
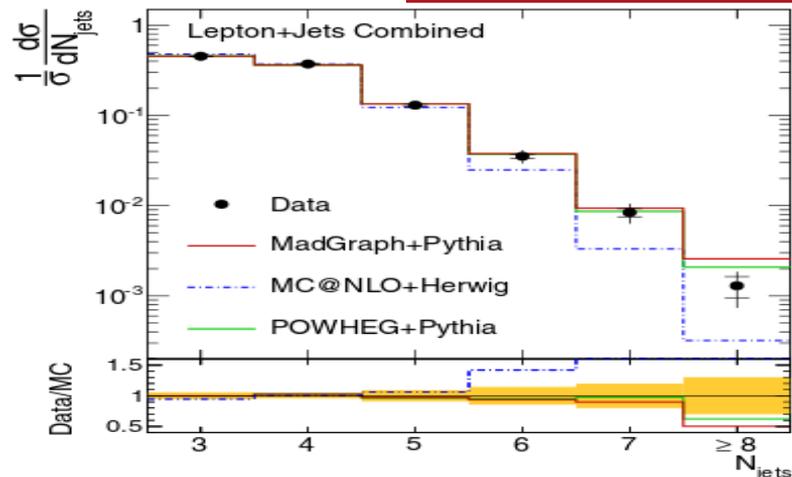
## Top + jets aggiuntivi :

- Sensibile alla presenza di **vertici dovuti ad interazione forte**
- **b-jets aggiuntivi**: difficili da riprodurre nella simulazione
- **“Gap fraction”**: molteplicità di eventi con 0 jets aggiuntivi in funzione del  $p_T$  del leading jet



CMS PAS TOP-12-041

EPJC 74 (2014) 3014



arXiv:1411.5621

# Sezioni d'urto single-top : Vtb, ratio, differenziali...

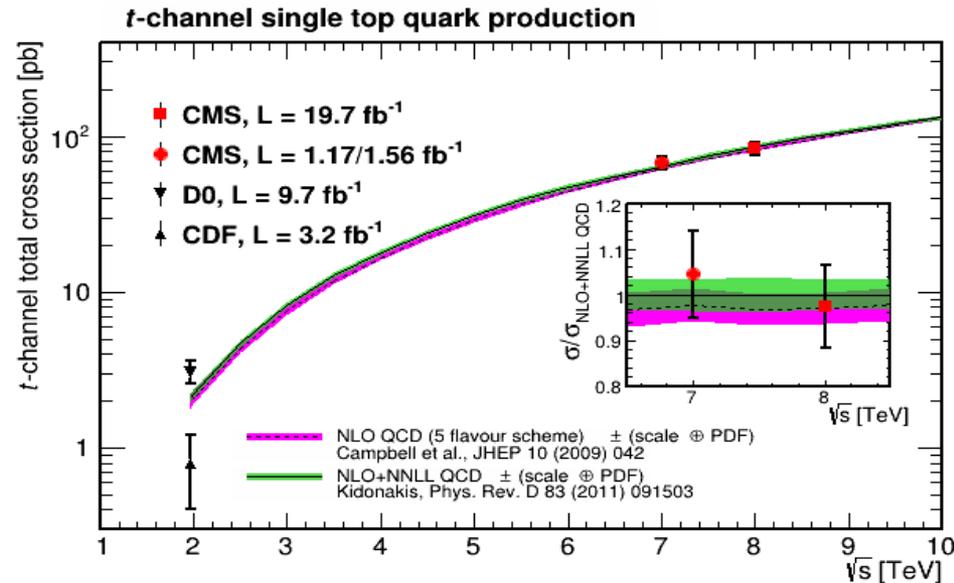
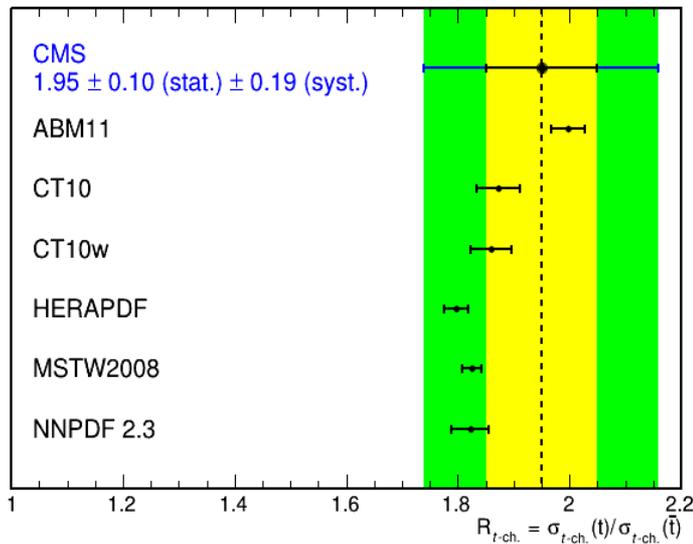
# Single top $t$ -channel: sezione d'urto inclusiva e per carica

## Canale $t$ :

- Sezione d'urto include vertice  $tWb$ : spazio a molte possibili interpretazioni della misura ( $V_{tb}$ ), bsm physics...
- Paper @8TeV misura inclusiva  $\rightarrow$  attualmente  $V_{tb}$  più precisa nel vertice di produzione (i.e. assumendo  $V_{tb} \sim 1$  nel decadimento)

$$|f_{L_V} V_{tb}| = 0.998 \pm 0.038 \text{ (exp.)} \pm 0.016 \text{ (theo.)}$$

CMS,  $L = 19.7 \text{ fb}^{-1}$ ,  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$



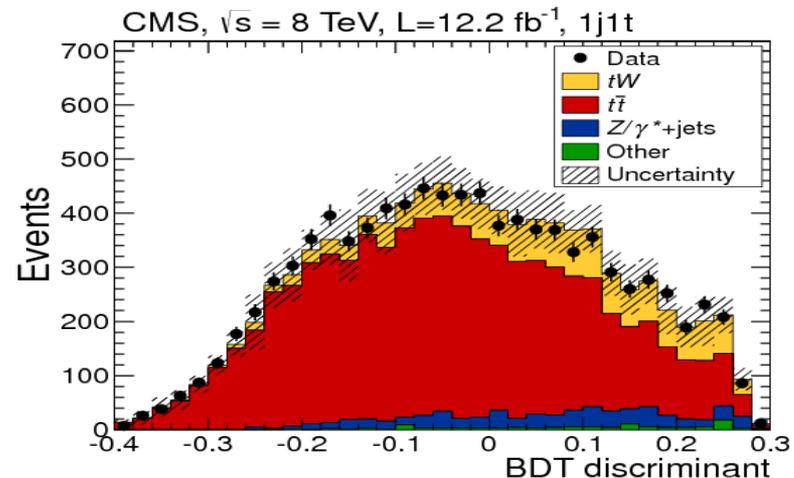
- Forte asimmetria di carica in pp:** legata a quark di valenza coinvolti (simile ad asimmetria della W)
- Ad alte energie: più constraints sulle pdf da misure combinate, possibile combinare misure per aumentare potere di esclusione

JHEP 06(2014)090

# Single top canali $tW$ ed $s$ :

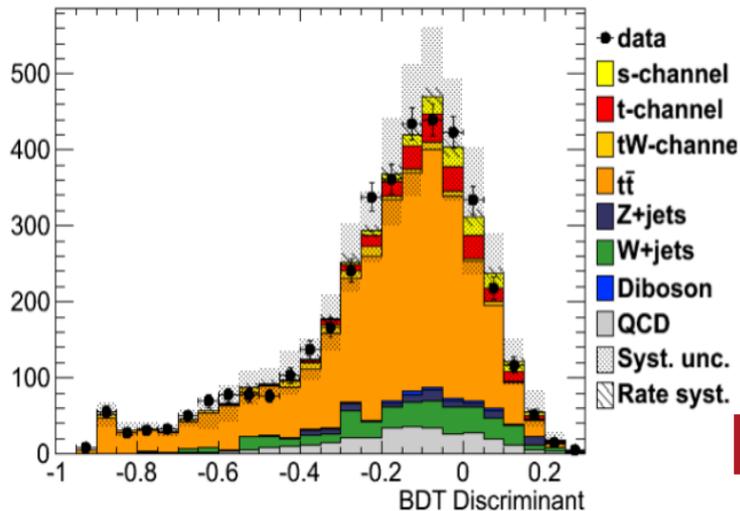
## Canale $tW$ :

- **Osservato per la prima volta a CMS!**
- **Miglioramenti in vista** → possibilità per misure l'accoppiamento includendo l'interferenza col  $t\bar{t}$ : produzione di “ $WWbb$ ”



**PRL 112, 231802**

CMS Preliminary,  $19.3 \text{ fb}^{-1}$ , Electrons,  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$



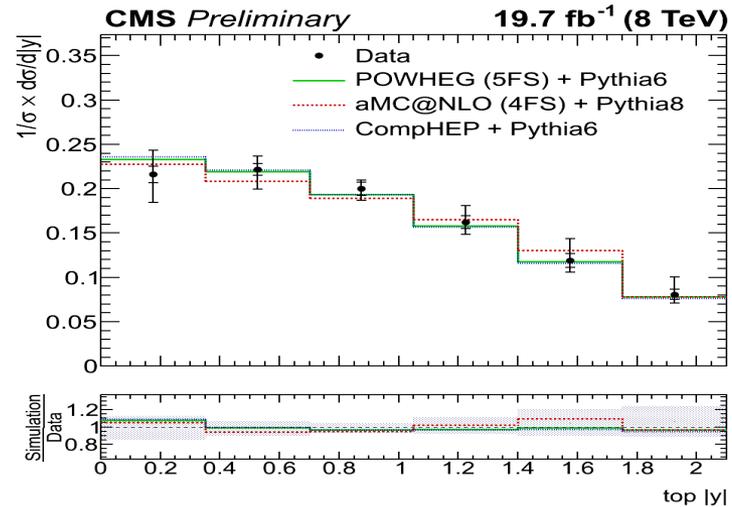
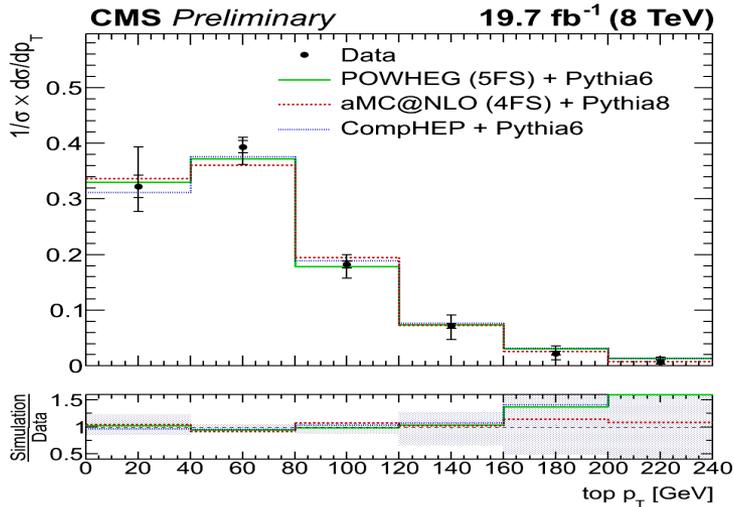
## Canale $s$ :

- **Osservato** a Tevatron! Molto difficile ad LHC a causa della bassa sezione d'urto
- Limite superiore aCMS:  $\sigma_{s\text{-ch.}} < 11.5 \text{ (17.0, 9.0) pb}$

**CMS-PAS-TOP-13-009**

# Sezione d'urto differenziale $t$ -channel

CMS-PAS-TOP-14-004



## Nel canale $t$ : dipendenza dal modello

- **4FS o 5FS**
- Metodo di matching NLO ME-PS (powheg vs eMC@NLO/CompHEP)
- Per ora misurata solo nella regione arricchita di segnale, in principio interessante anche in altre regioni, anche se sarà necessaria più statistica.

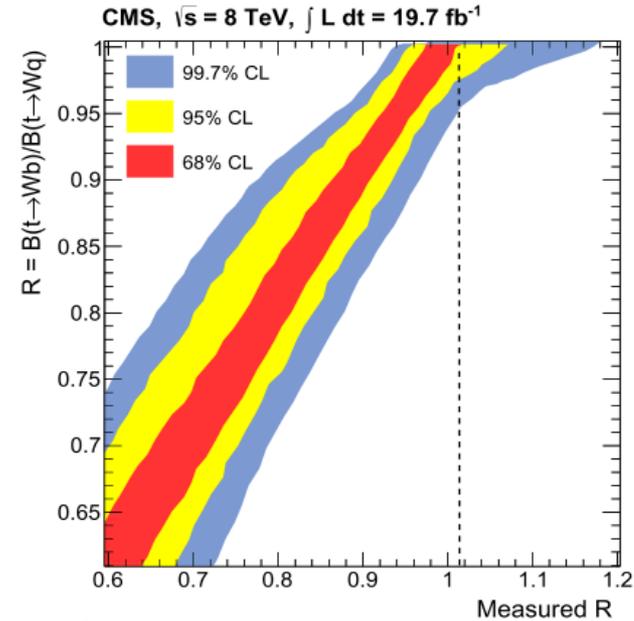
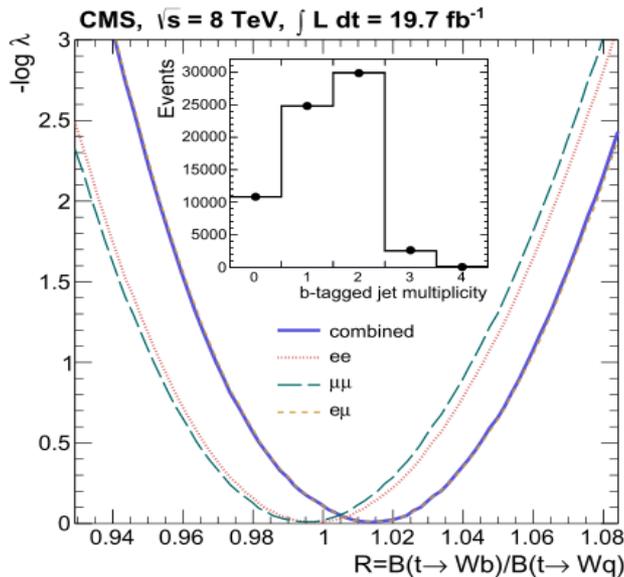
# Proprietà del top e dei decadimenti

# La misura di R

◦ **Frazione  $R = BR(t \rightarrow Wb)/BR(t \rightarrow Wq)$**

- Permette misura di  $|V_{tb}|$

- Limite di unitarietà  $|V_{tb}| = 0.999146$



- **Misura più precisa:**

$R = 1.014 \pm 0.032 \rightarrow |V_{tb}| = 1.007 \pm 0.016;$   
 Assuming  $R < 1$ :  $|V_{tb}| > 0.975 @ 95\%CL$

- assieme alla sez. d'urto single-top ci dà la top width:

$$\Gamma_t = \frac{\sigma_{t-ch}^{obs.}}{B(t \rightarrow Wb)} \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)}{\sigma_{t-ch}^{theo.}} = 1.36_{0.11}^{+0.14}$$

PLB 736(2014)33

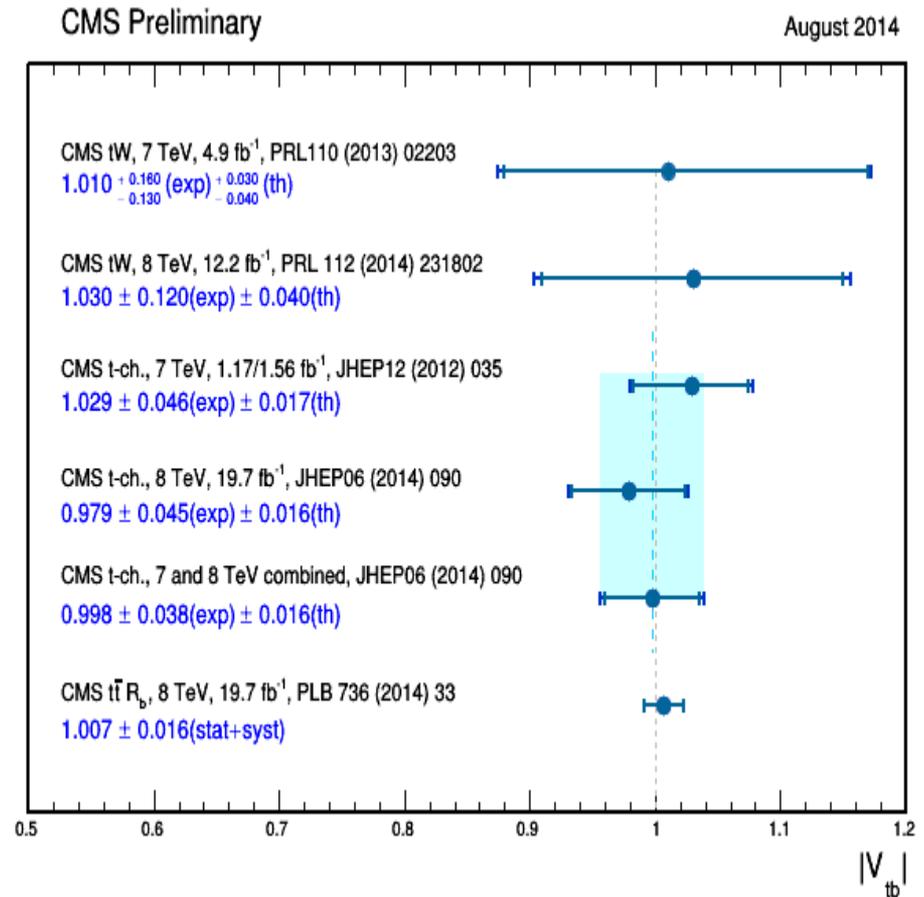
# Vtb in diverse assunzioni:

- **Caso single-top:**

- misura di  $V_{tb}$  nella produzione
- si considera  $|V_{tb}| = 1$  nel decadimento, e  $|V_{td}|, |V_{ts}| \ll V_{tb}$  in produzione
- permette di misurare contributi da particelle anche a massa  $> m_{top}$

- **Caso  $t\bar{t}b$ :**

- misura di  $V_{tb}$  nel decadimento
- è la più precisa
- particelle BSM sono vincolate ad avere  $m_{BSM} < m_{top}$

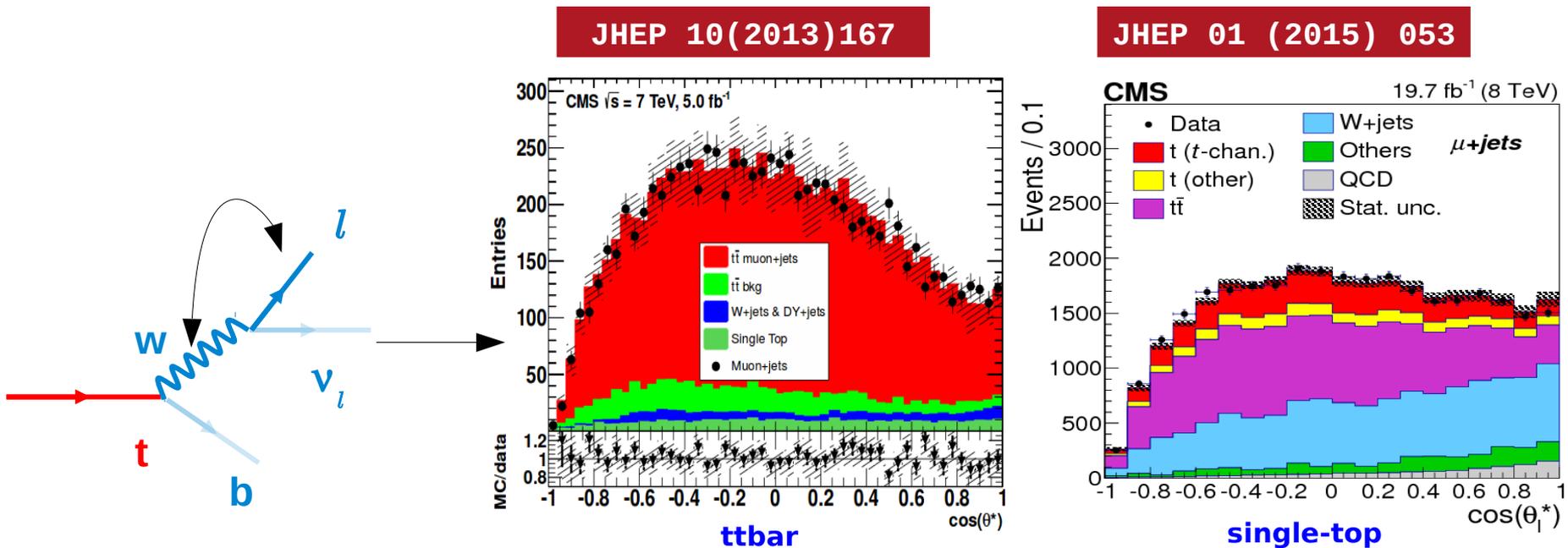


# Elicità della W nei decadimenti del top

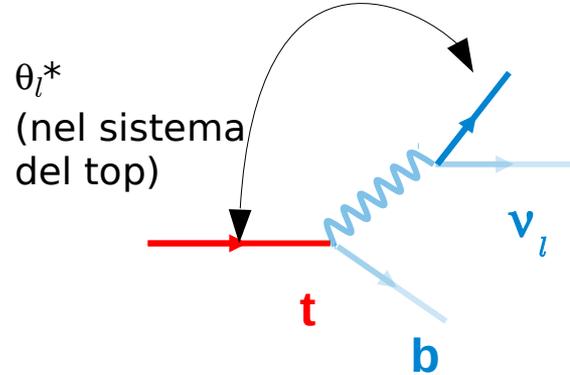
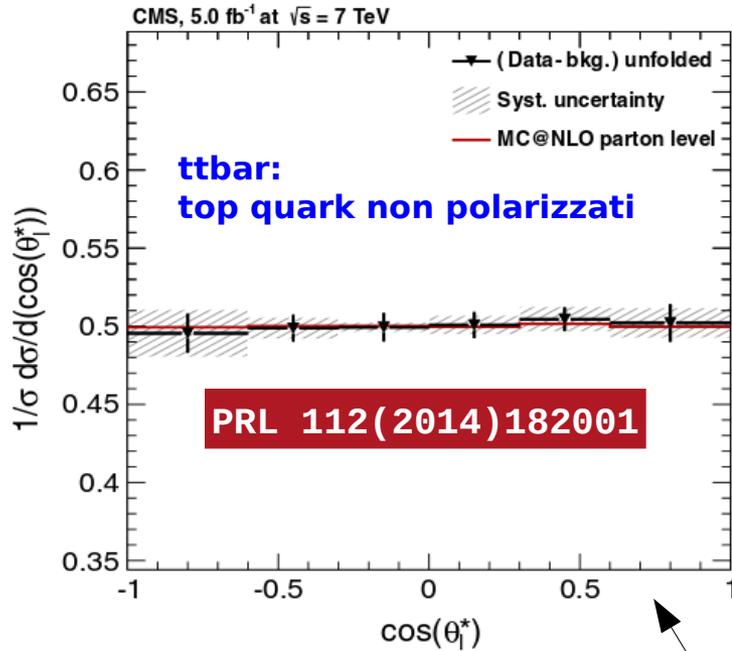
- **Frazioni di W** polarizzate left ( $F_L$ ), right ( $F_R$ ) e longitudinalmente ( $F_0$ )
- **Distribuzione angolare** del leptone e del bosone W nel sistema di riferimento del top

$$\rho(\cos\theta_l^*) \equiv \frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d\cos\theta_l^*} = \frac{3}{8}(1 - \cos\theta_l^*)^2 F_L + \frac{3}{8}(1 + \cos\theta_l^*)^2 F_R + \frac{3}{4}\sin^2\theta_l^* F_0$$

- **Proprietà del decadimento:** può essere misurata sia nei canali  $t\bar{t}$  che di top singolo con precisione comparabile

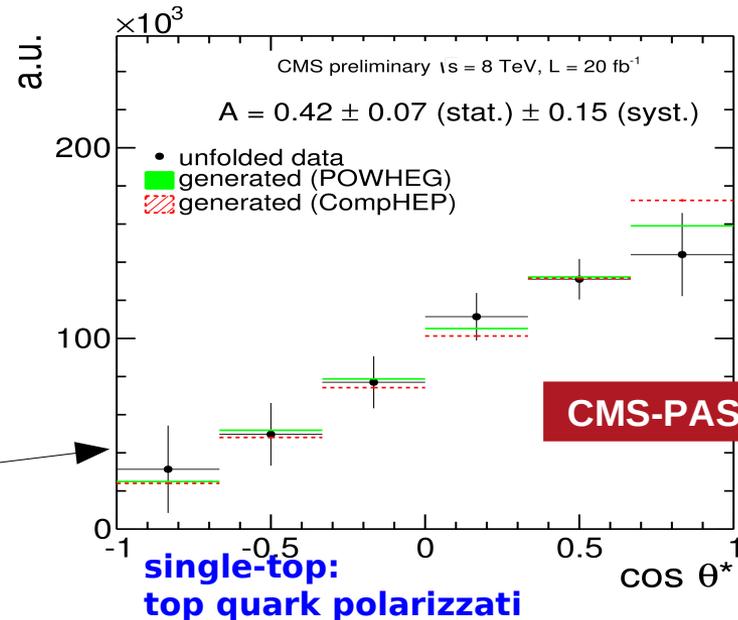


# Polarizzazione del top: produzione di coppie $t\bar{t}$ e single-top



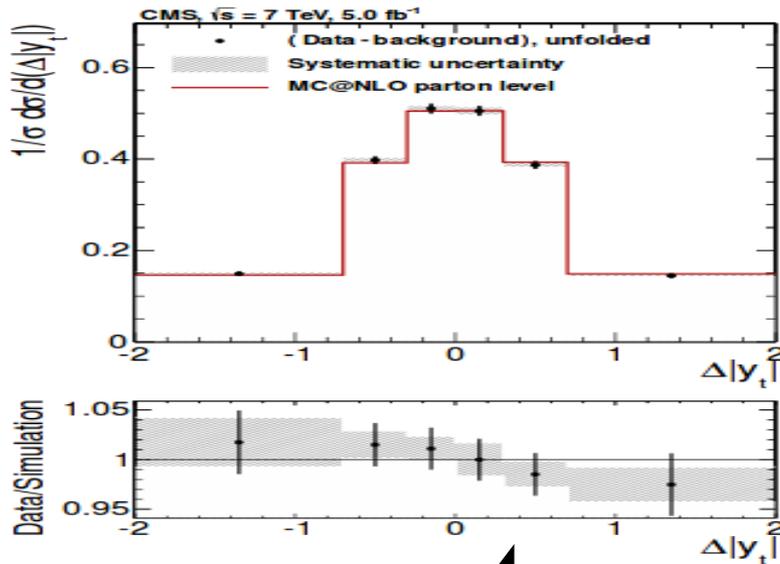
## o Polarizzazione dei prod. di decadimento:

- nessuna nel caso di interazione forte  $t\bar{t}$
- ben definita nel caso di single-top



# Asimmetria di carica: inclusiva e differenziale

JHEP 04 (2014) 091



## Misura effettuata a 7 TeV ed 8 TeV

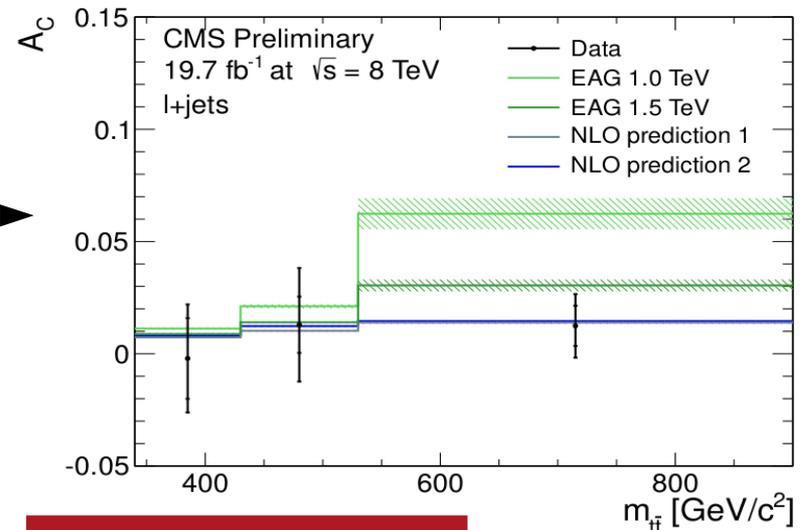
- Buon accordo con SM, anche con misure differenziali

- permette di escludere modelli con accoppiamenti anomali, per esempio **E**ffective **A**xial-vector **G**luon couplings  
(in figura PRD 85 (2012) 074021, Gabrielli et al.)

## Asimmetria in produzione top-antitop:

- distribuzioni a maggiore o minore rapidità

$$A_C = \frac{N(\Delta|y_t| > 0) - N(\Delta|y_t| < 0)}{N(\Delta|y_t| > 0) + N(\Delta|y_t| < 0)}$$



CMS PAS TOP-12-033

# Massa del top

# Misure a 7/8 TeV:

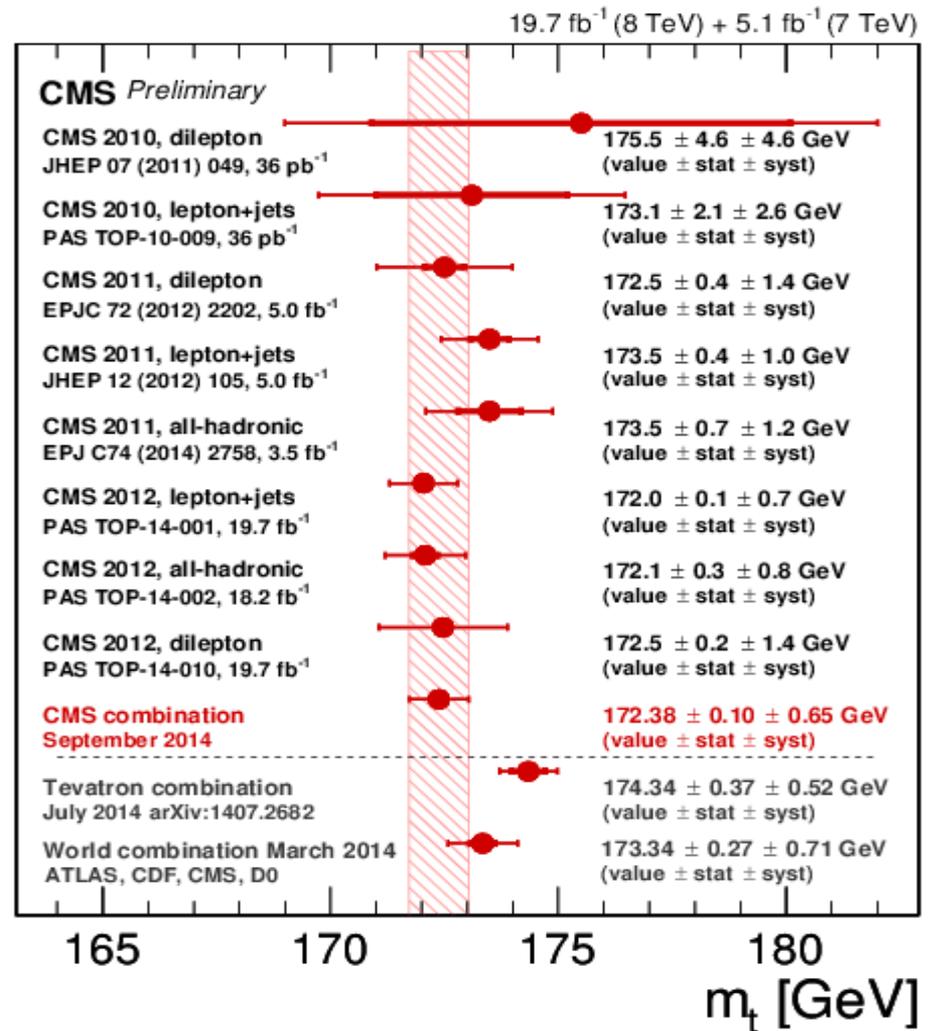
## Massa del top:

- Precisione arrivata a  $\sim 0.8$  GeV!
- Combinazione di più misure (possibile anche a diverse energie)

## Diversità genetica è la chiave per il miglioramento!

- Misure di diversa specie e con diverse sistematiche
- Più statistica darà accesso a tecniche alternative!

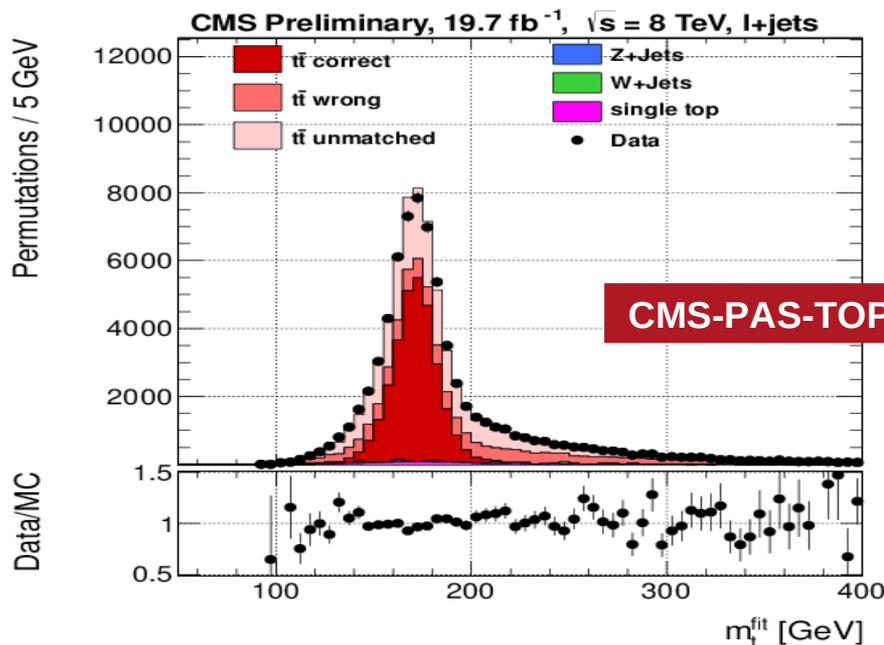
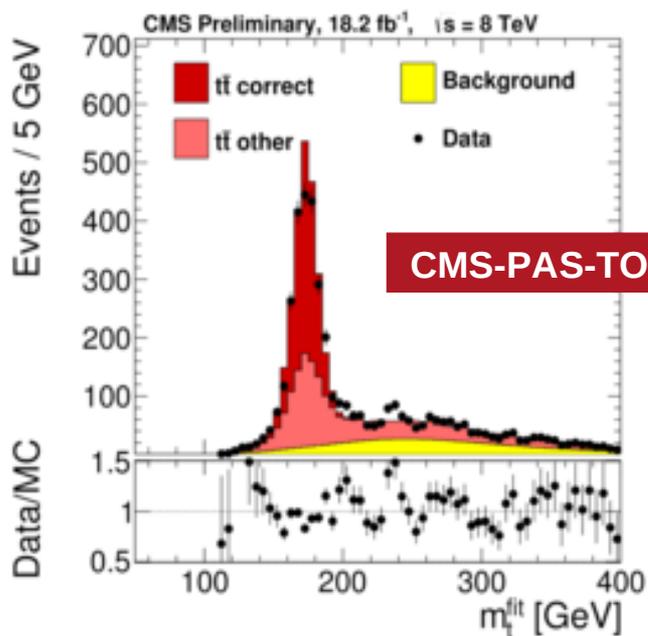
**CMS PAS TOP-14-015**



# Highlights @ CMS: misura più precise

## Canale semileptonico:

- **Fit simultaneo a  $m_t$  e JES**
- Fit cinematico per ottenere migliore permutazione: eventi pesati



## Canale full-hadronic:

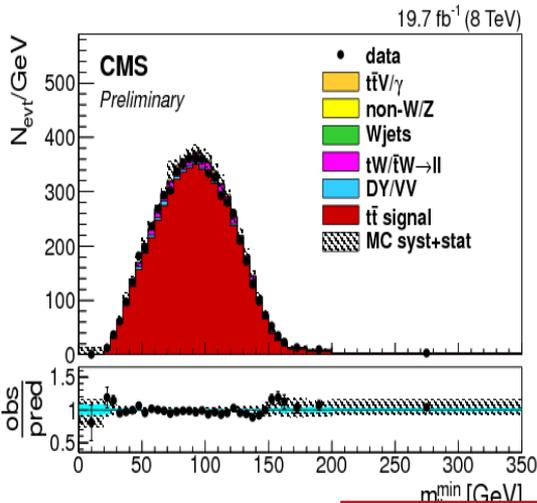
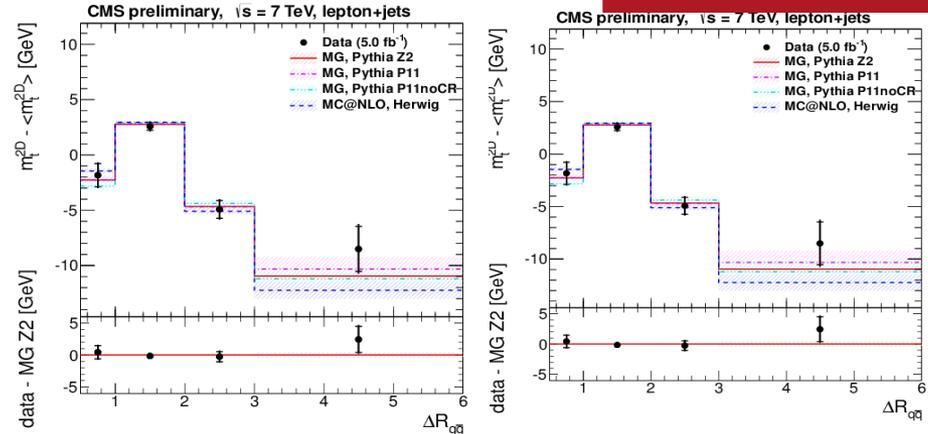
- **Anche qui fit cinematico:** riduce anche la contaminazione da fondo
- **Misura competitiva con il semileptonico!**

# Highlights @ CMS: altre idee!

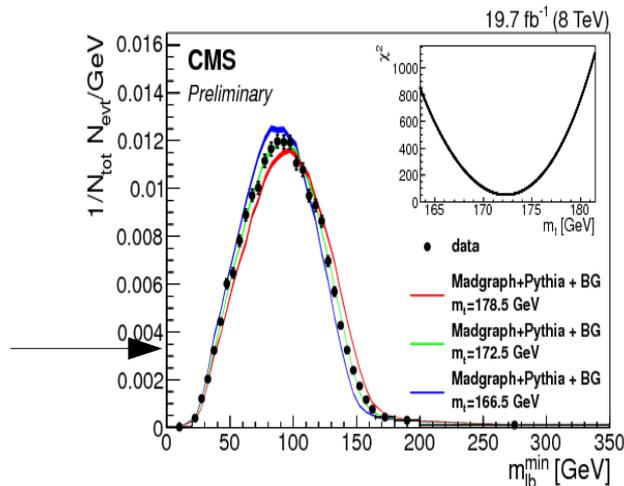
CMS PAS TOP-12-029

## Massa "differenziale":

- Massa in diversi bin di pt/rapidità dei tops
- Permette di controllare effetti di **color reconnection** e dovuti ai modelli di ISR/FSR



CMS PAS TOP-14-014



## Variabili alternative:

- Misura che sfrutta massa di leptone + jet b
- Endpoint cinematico in caso di permutazione giusta
- **Si può sfruttare la dipendenza della shape dalla massa del top!**

# Canali rari/FCNC

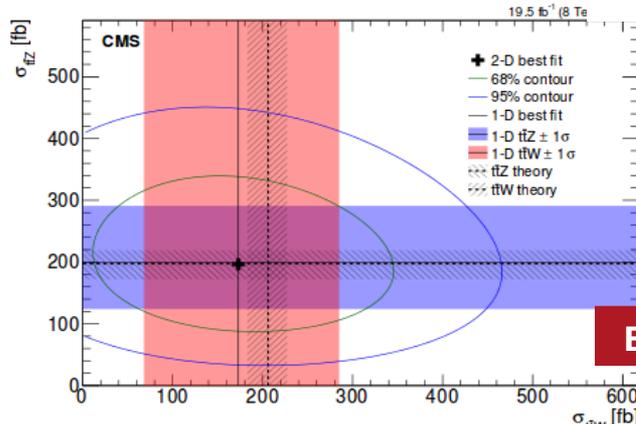
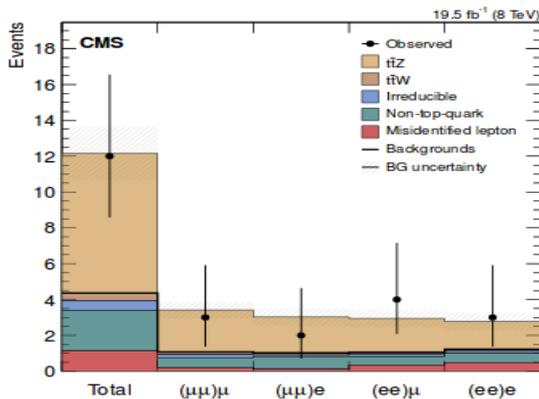
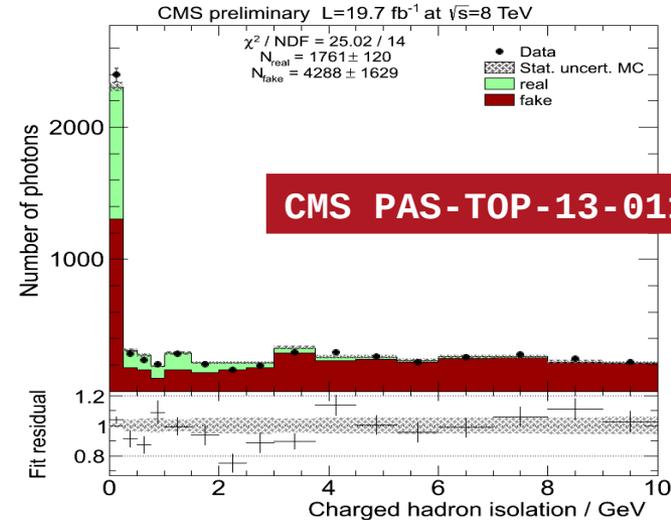
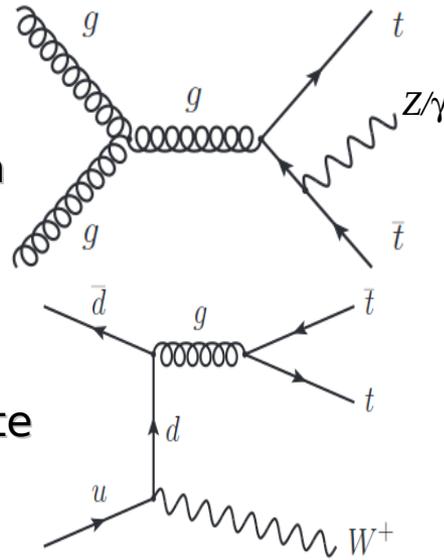
# ttbar + W/Z/gamma

- **tt +  $\gamma/Z$ :**

- Sonda l'accoppiamento elettrodebole a corrente neutra

- **tt + W:**

- a 13 TeV: diventerà importante anche misurarne l'asimmetria di carica!

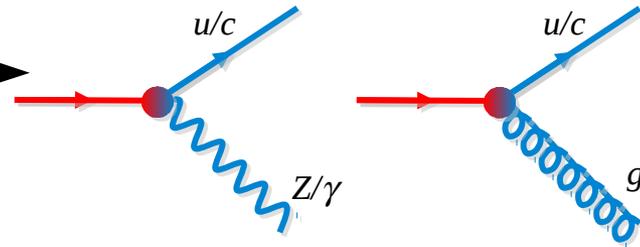


EPJC 74(2014)3060

# Accoppiamenti non-SM: FCNC in decadimento e produzione

- **top decays:**

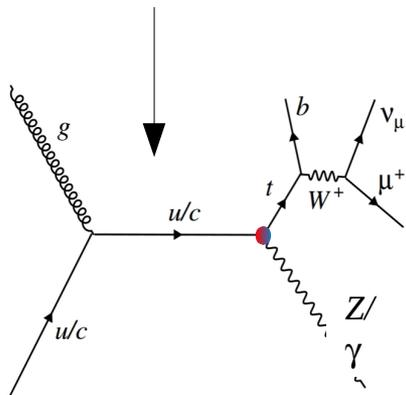
- FCNC danno decadimenti  $t \rightarrow u/c + g/z/\gamma$ :  
eventi con 2 tops:



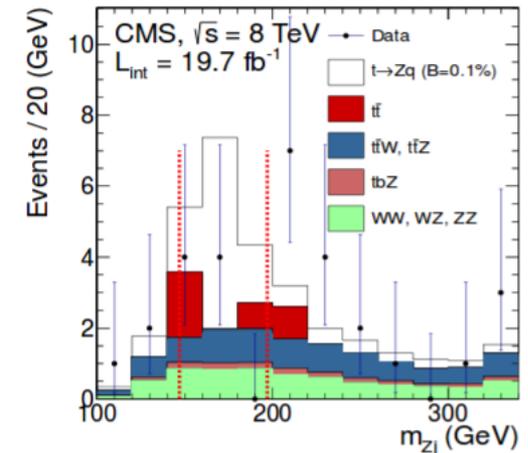
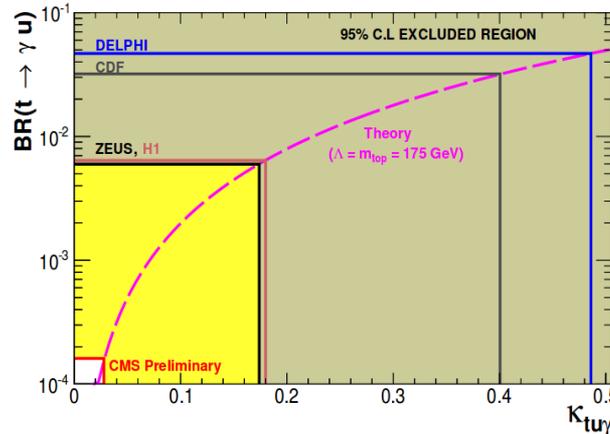
$BR(t \rightarrow Zq) < 0.05\% \text{ (CMS)}$

- **single-top + Z/gamma production:**

- Bassa cross section ad LHC  
nel modello standard ( $\sim 0.2$  pb).



**CMS PAS-TOP-14-003**



**PRL 112(2014)171802**

# Conclusioni

- **Studi a 7-8 TeV:**

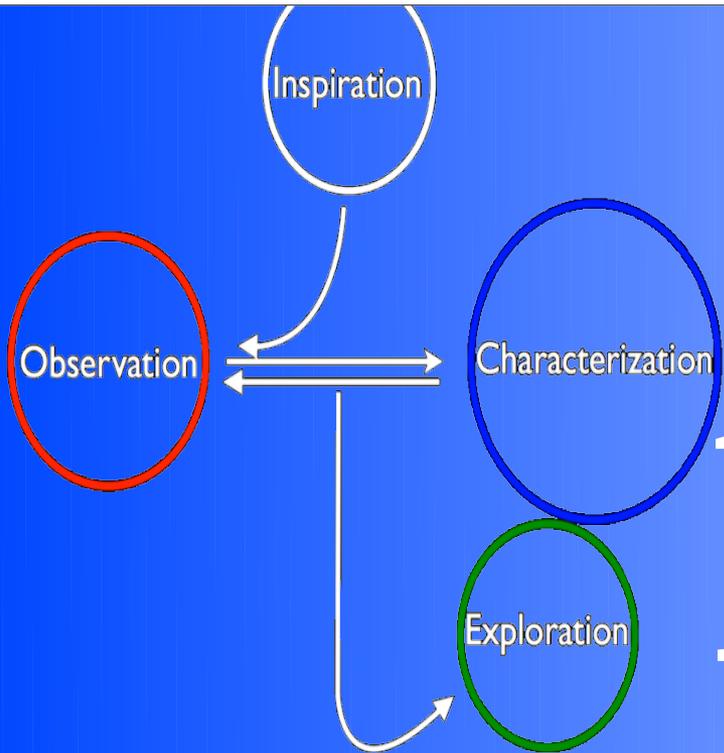
- Le misure sui quark top a CMS si sono rivelate un banco di prova per lo SM ed un utile strumento per

- In molti campi si è raggiunto già il “regime sistematico” in cui le incertezze di modellizzazione e strumentali superano di gran lunga quelle statistiche --> il modello diventa oggetto di misura!

- **... e a 13 TeV?**

- Misure di precisione, anche in ambito differenziale: più armi per individuare deviazioni dallo SM, migliori limiti sui modelli!

- Misure in regimi di top “boosted”, dove il momento del top è molto maggiore della sua massa!



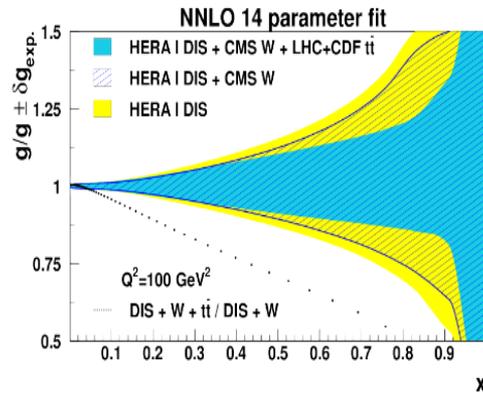
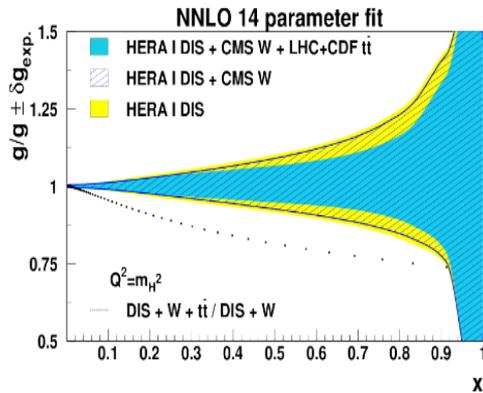
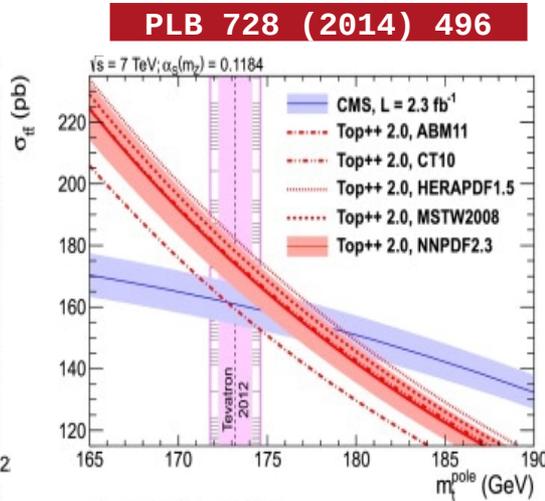
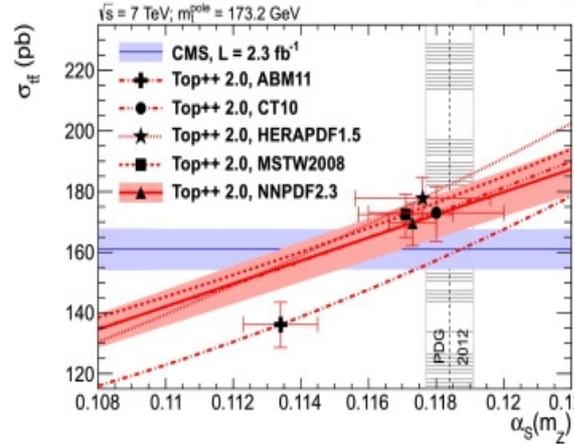
hanks!

# Backup

# Cosa ne ricaviamo?

## Constraints a $\alpha_s$ , $m_t$ :

- $m_t$  dalla sez. d'urto complementare a quella "diretta"
- $\alpha_s$  è solo uno dei parametri da cui la sez. d'urto dipende



- PDF: miglioramento dei gluoni ad alto  $x$
- Fondamentale per andare ad alte energie!

arXiv:1406.0386

# top mass: 13 TeV ed oltre!

## Ultimate precision: O(200 GeV)!

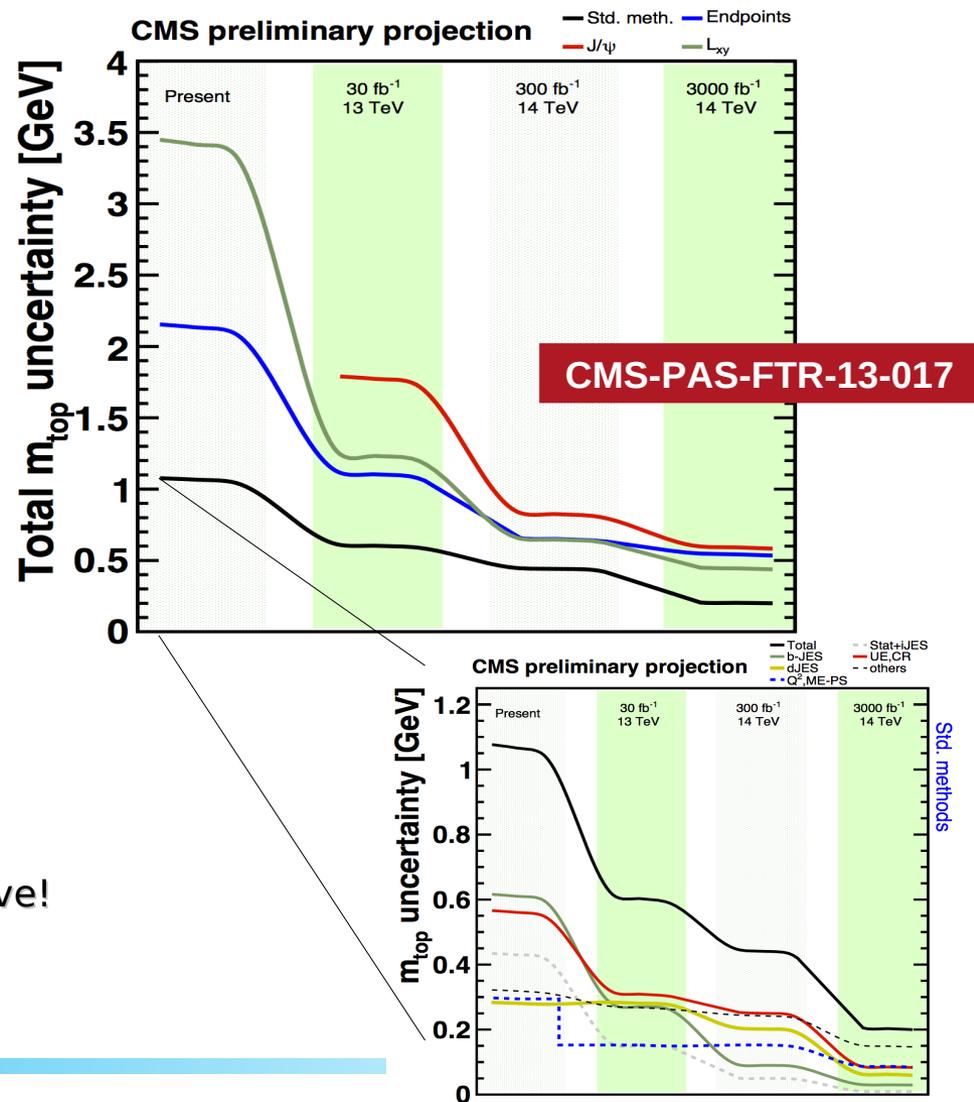
- Studio di JES/Adronizzazione
- Profiling delle incertezze

## Necessita miglioramento del modello:

- produzione @NLO di  $t\bar{t}$  +  $tW$  single top, includendo l'interferenza
- Studi di adronizzazione dedicati

## Nota Bene:

- Non include re tutte le nuove idee!
- Le previsioni hanno già superato le aspettative!



# Perspectives for SM measurements: ttZ and single-top

- **Signal and background cross section variation, 8 vs 13 TeV:**

Single top t-channel	<b>8TeV</b>	<b>13 TeV</b>	<b>Ratio 13/8</b>
<b>t-channel(signal)</b>	<b>85</b>	<b>210</b>	<b>2.4</b>
<b>tt(background)</b>	<b>246</b>	<b>810</b>	<b>3.2</b>
<b>W+Jets (backg.)</b>	<b>~ 34k</b>	<b>~63k</b>	<b>~1.8</b>
Single top W-assoc.	<b>8TeV</b>	<b>13 TeV</b>	<b>Ratio 13/8</b>
<b>tW (signal)</b>	<b>22</b>	<b>71</b>	<b>3.2</b>
<b>tt(background)</b>	<b>246</b>	<b>810</b>	<b>3.3</b>
<b>Z+Jets (backg.)(1)</b>	<b>1.2k</b>	<b>~2k</b>	<b>1.7</b>
top pair + Z	<b>8TeV</b>	<b>13 TeV</b>	<b>Ratio 13/8</b>
<b>ttZ (signal)</b>	<b>0.2</b>	<b>~0.7(3)</b>	<b>3.2</b>
<b>ttW (signal/bkg to ttZ)</b>	<b>0.2</b>	<b>~0.6(3)</b>	<b>3</b>
<b>WZ (background)(2)</b>	<b>34</b>	<b>66</b>	<b>2.0</b>

(1): Computation with FEWZ 3.1

(2): Computation with MCFM 6.6

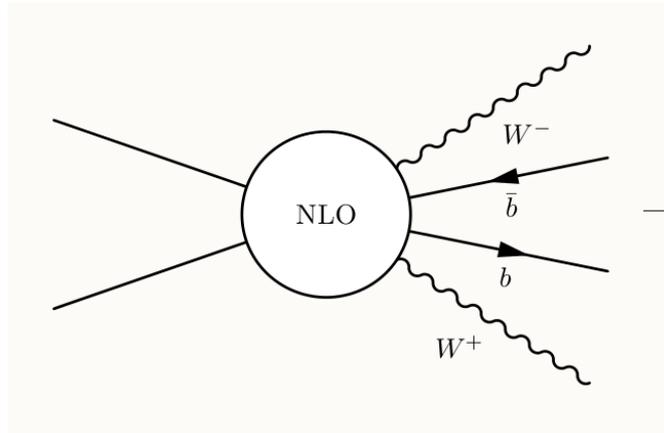
(3): MCFM, Campbell, Ellis: arXiv:1204.5678v1f

- **Main uncertainties:**

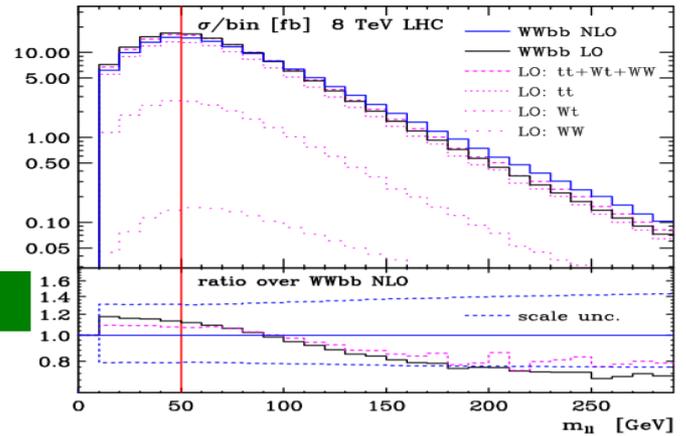
- t-channel single top: theory modeling --> NLO matching procedure + flavour scheme
- tW : signal and background modeling
- For ttZ / ttW : statistics, lepton mis-id, background control

# NLO tW + ttbar: WWbb

- **WWbb** : new theory framework for single top-W + tt production



arXiv:1311.4893



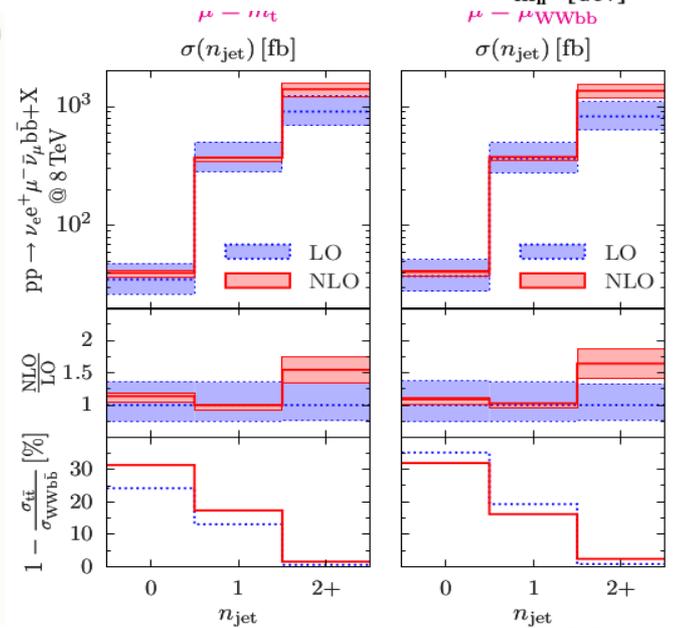
- (2) → (4) process, doable, for instance in aMC@NLO

- both ttbar and tW become one at NLO

- Current LO tW and ttbar would become a “fiducial” measurement!

- Also, better for ttbar processes in principle  
**Caveat #1:** huge calculation time and EWK vertices  
 → not doable with high jet multiplicity for now

arXiv:1312.0546



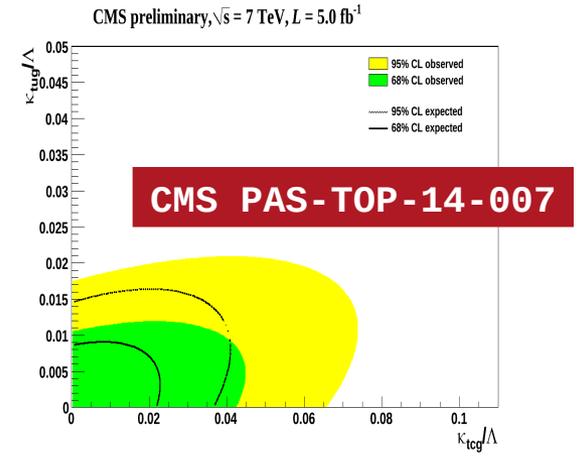
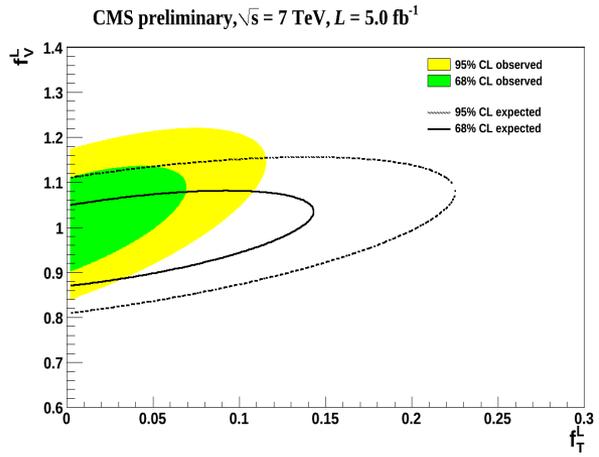
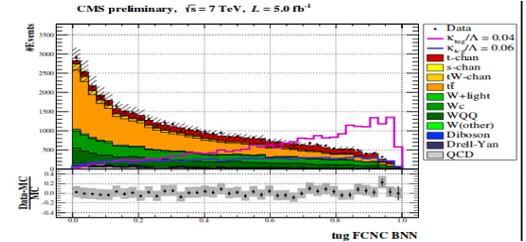
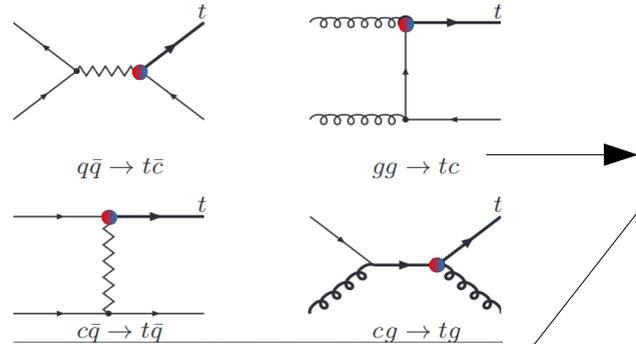
# Search for non-SM couplings single-top production

## Single-top quarks:

- Can be produced via FCNCs together with  $u/q/g$

- Searched for at 7/8 TeV

- Also, possible to search for right-handed vector components

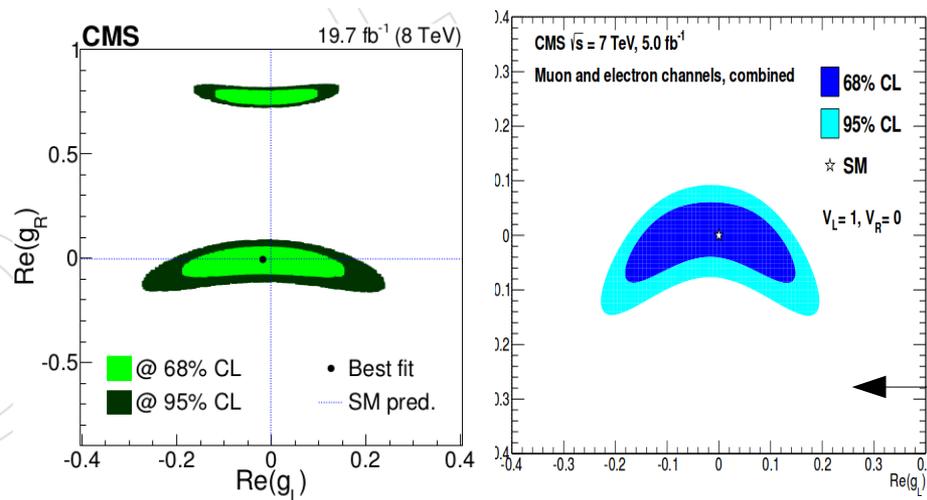
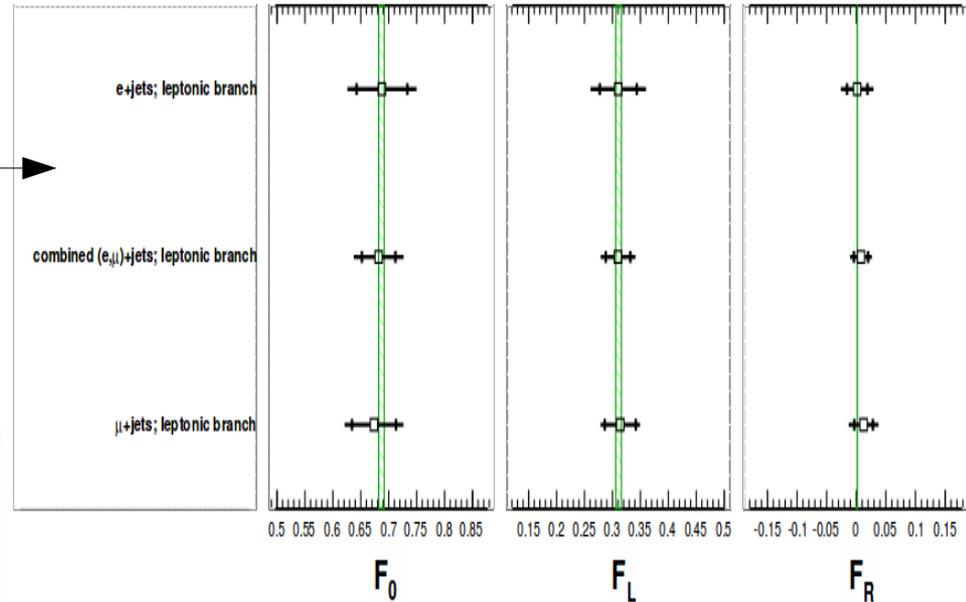


# W-helicity in top-quark decays

- From the  $\cos\theta^*$  distribution:

- $(F_L), (F_0)$  values can be obtained in decays of tops from all production modes

- this is done mostly in  $t\bar{t}$  but also can be done in single-top events



- Constraints to anomalous couplings:

- Extracted limits on BSM anom. couplings ( $G_L, G_R$ ) from the measurement of  $(F_L, F_0)$