

Fisica del top

VII workshop italiano sulla fisica pp ad LHC,
Pisa, (Italia) 18/05/16

Alberto Orso Maria Iorio, Matteo Franchini, Simone Bifani

per le collaborazioni Atlas, CMS, ed LHCb

Outline

- **Introduzione al quark top:**
 - meccanismi di produzione
 - canali di decadimento
- **Misure sul quark top:**
 - produzione forte:
 - misure inclusive e loro interpretazione
 - misure differenziali e proprietà del quark top
 - produzione elettrodebole: quark top singolo
 - massa del quark top

Descriveremo misure di Atlas, CMS, ed LHCb da Run I e II di LHC

Per altri riferimenti guardare anche:

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

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsTOP>

<https://lhcb.web.cern.ch/lhcb/Physics-Results/LHCb-Physics-Results>

Produzione di quark top ad LHC

Meccanismo di produzione...

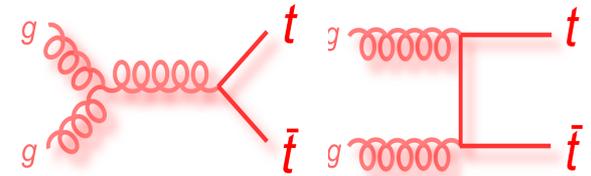
...cross section...

...diagrammi LO

- **coppie tt** via strong interaction:
 - meccanismo dominante ad LHC
 - funzione di α_s
 - sensibile alle pdf

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

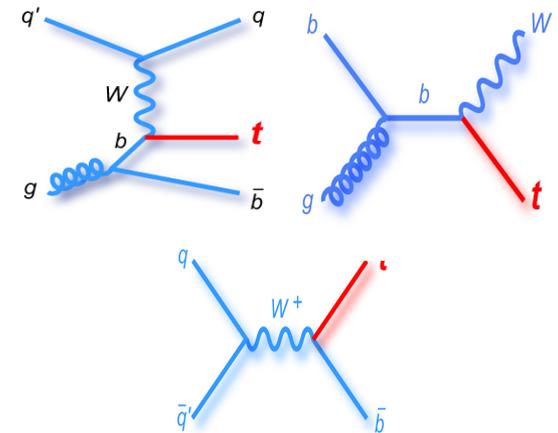
pp collisions @7/8/13 TeV:
 $\sim 172/246/830$ pb



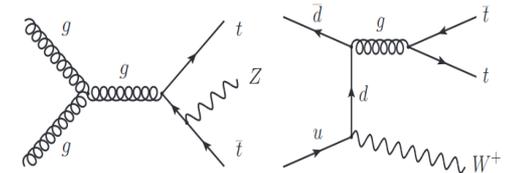
- **top quark singoli (single top):**
 - interazioni deboli a corrente carica
 - canali di t , s , e top + bosone W
 - vertice tWb in produzione
 - sensibile a V_{tb}

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

pp collisions @7/8/13 TeV:
 $\sim 66/85/217$ pb (t -ch.)
 $\sim 15/22/72$ pb (tW)
 $\sim 4.4/5.5/11$ pb (s -ch.)

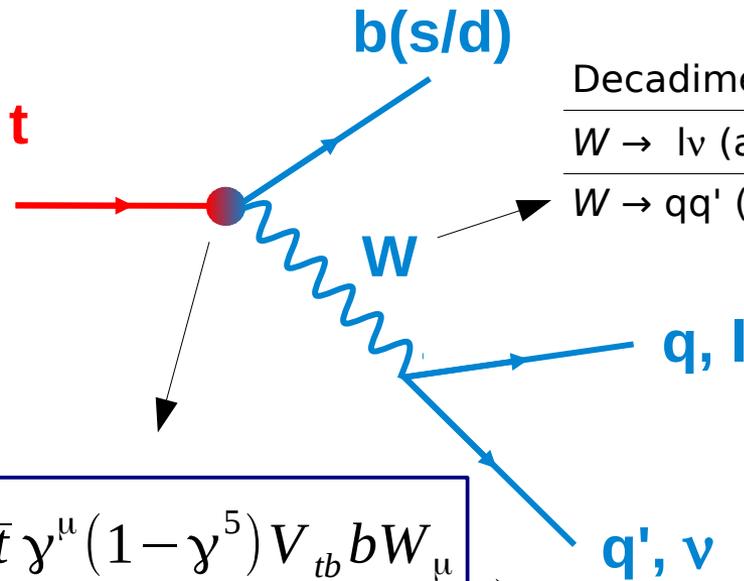


- **top + X :**
 - coppia di top / top singolo + W, Z, γ ...
 - permette di sondare interazioni elettrodeboli a corrente neutra, FCNC, etc.



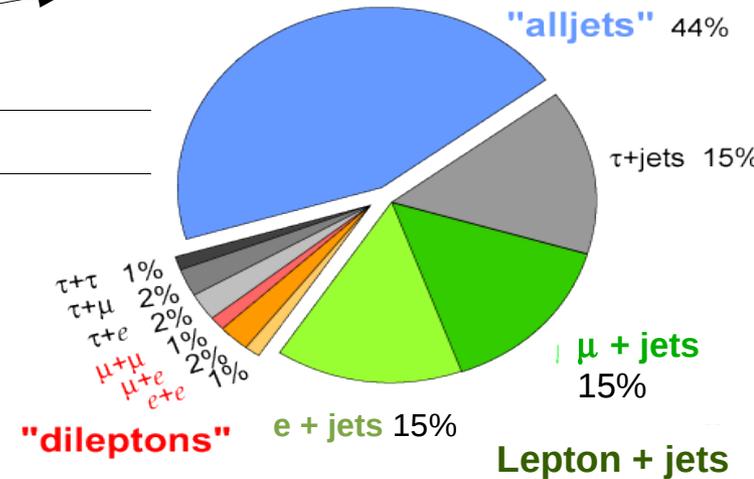
Decadimenti del quark top e stati finali

Decadimenti perlopiù elettrodeboli:



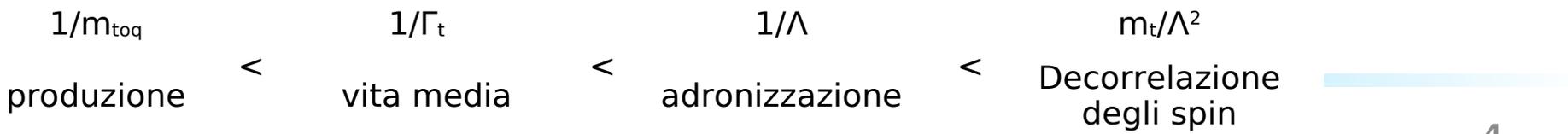
Decadimento W:	BR:
$W \rightarrow l\nu$ (any)	0.32
$W \rightarrow qq'$ (any)	0.68

Top Pair Branching Fractions



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

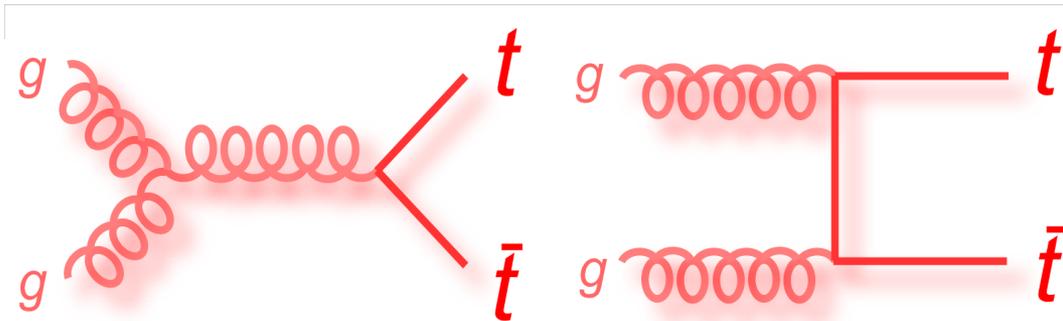
- Vertice elettrodebole **tWb**:
- V-A: **polarizzazione** dei prodotti di decadimento ed **elicità definita per la W**
- Elemento di matrice CKM $|V_{tb}| \sim 1 \rightarrow \Gamma(t \rightarrow b) \gg \Gamma(t \rightarrow s, d)$



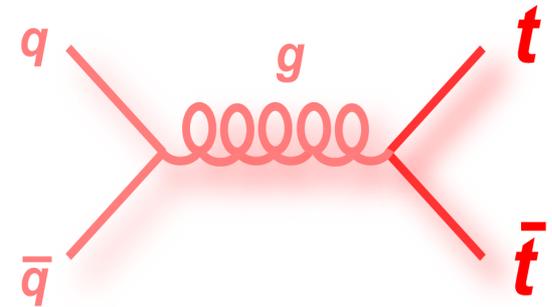
Produzione di quark top: sezione d'urto inclusiva e interpretazione

Produzione di coppie top-antitop: una sonda per le interazioni forti!

gg



qq



- **Produzione forte:**

- sensibile ad α_S nel vertice di produzione
- dipende dalle pdf del gluone
- un banco di prova per la modellizzazione della QCD!

- **Stati finali con segnatura pulita:**

- permette di misurare proprietà del vertice tWb
- è una buona “sonda” per la produzione associata!

$\sigma(tt)$ (PhysRevLett.110.252004)

@13 TeV

832 +- 40 pb
(~90% gg / 10% qq)

@8 TeV

252 +- 12 pb
(~85% gg / 15% qq)

@7 TeV

178 +- 10 pb
(~85% gg / 15% qq)

All with top mass = 172.5 GeV

La “riscoperta” del quark top a 13 TeV!

La storia recente:

- **Prime osservazioni a 13 TeV:**

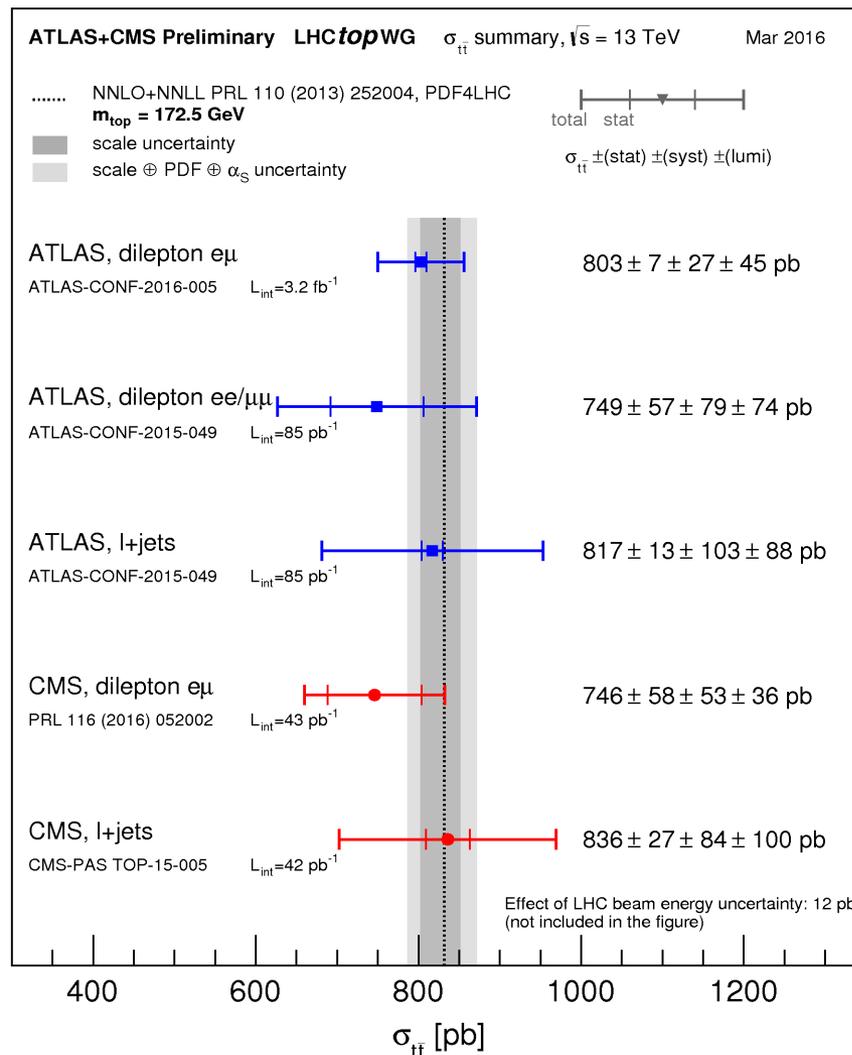
- canali dileptonici, a scarsa contaminazione dal fondo

- canali semi-leptonici: più statistica ma minore purezza

- **Misure di precisione:**

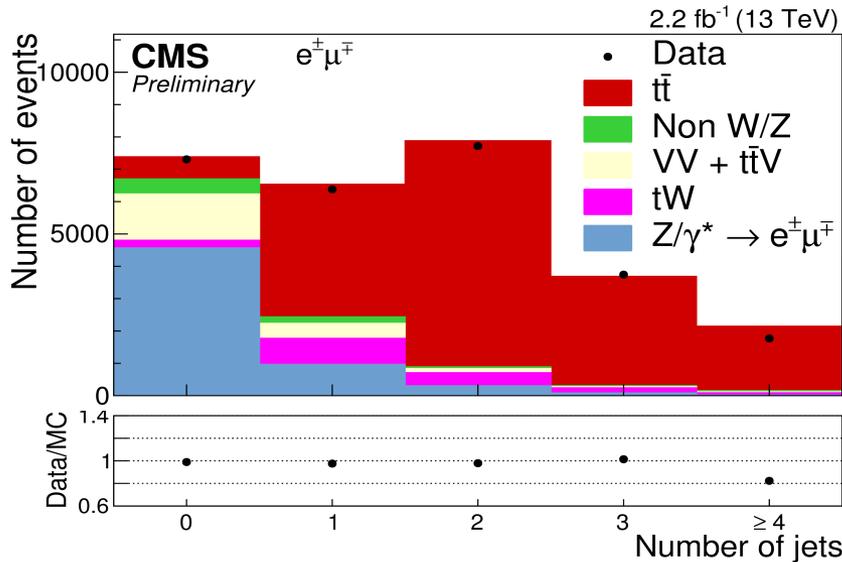
regime dominato da sistematiche:
ci siamo già anche a 13 TeV!

NB: il plot non è aggiornato con le ultime misure che riporteremo di seguito



Le misure più precise tt 13 TeV: canali dileptonici

CMS TOP-16-005



Fit a diversi bin di b-jet multiplicity

- stessa selezione, richiedendo in più almeno 1 b-tag
- misura del b-tag *in situ*

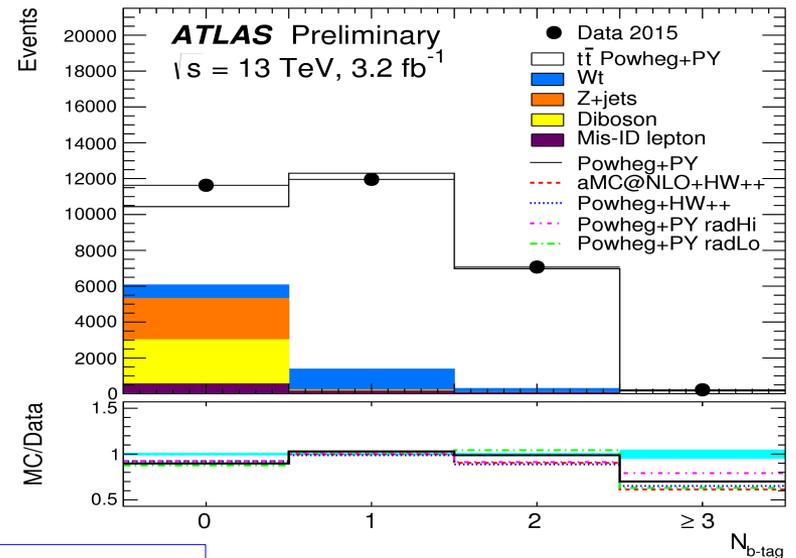
$$N_1 = L\sigma_{t\bar{t}} \epsilon_{e\mu} 2\epsilon_b (1 - C_b \epsilon_b) + N_1^{\text{bkg}}$$

$$N_2 = L\sigma_{t\bar{t}} \epsilon_{e\mu} C_b \epsilon_b^2 + N_2^{\text{bkg}}$$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 803 \pm 7 \text{ (stat)} \pm 27 \text{ (syst)} \pm 45 \text{ (lumi)} \pm 12 \text{ (beam)} \text{ pb}$$

- o **Analisi “cut and count”:**
 - coppia $e\mu$: ($p_T > 20$ GeV, $|\eta| < 2.5$)
 - almeno due jet: $p_T > 30$ GeV, $|\eta| < 2.5$
- o **Fondi principali:**
 - top singolo tW, Drell-Yan

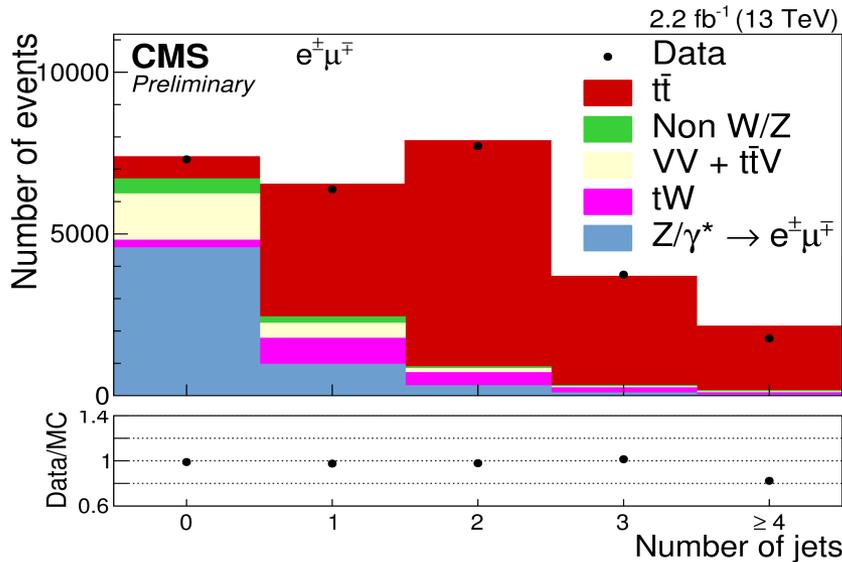
$$\sigma_{t\bar{t}} = 793 \pm 8 \text{ (stat)} \pm 38 \text{ (syst)} \pm 21 \text{ (lumi)} \text{ pb}$$



ATLAS CONF-2016-005

Fonti di incertezza

CMS TOP-16-005

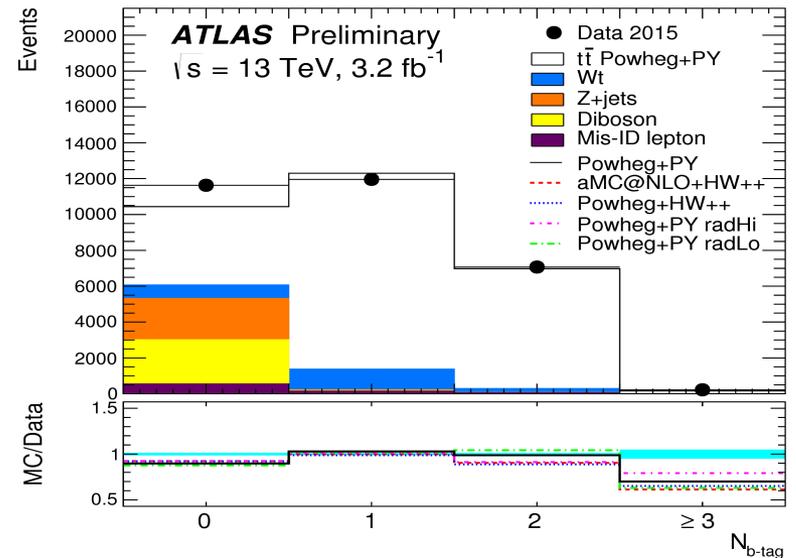


◦ **Si può ancora migliorare!**

- migliorare le calibrazioni/
misure di efficienza
- laddove possibile: misurare in situ
le componenti dell'incertezza sistematica!

Incertezze principali su σ_{tt} [%]

	Atlas	CMS
Modello NLO tt	0.8	2.1
Modello di adronizzazione tt	2.8	1.3
Scala di energia dei jet	0.3	2.2



ATLAS CONF-2016-005

Perché migliorare sez. d'urto tt?

→ misura della top quark “pole mass”

- **Re-interpretazione delle misure di sezione d'urto:**

- massa del topmass m_{top} : dipende dallo schema di rinormalizzazione usato

- può essere derivato dalla sezione d'urto con una parametrizzazione (esempio da una misura di cms)

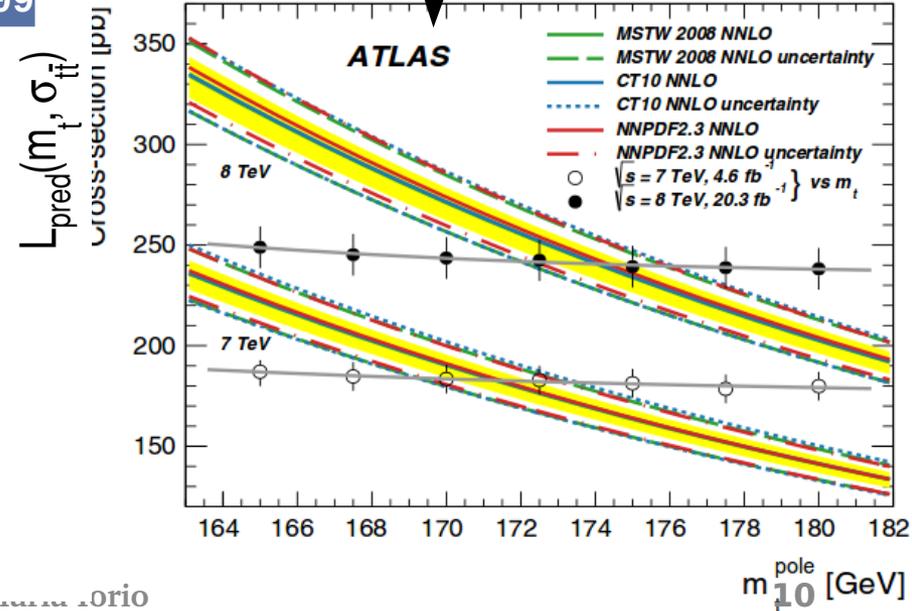
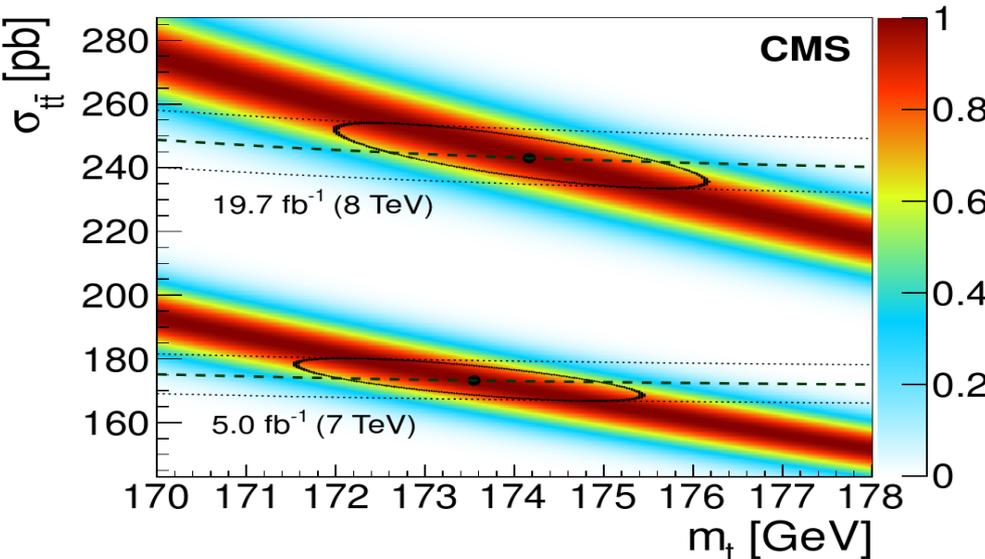
- stesse incertezze della sezione d'urto: luminosità, fondi, ricostruzione dei leptoni

$$\sigma_{tt}(7 \text{ TeV}, m_t^{MC}) = \dots \exp \left[-0.1718 (m_t^{MC} / \text{GeV} - 178.5) \right] + 170.9 \text{ pb}$$

$$\sigma_{tt}(8 \text{ TeV}, m_t^{MC}) = \dots \exp \left[-0.1603 (m_t^{MC} / \text{GeV} - 185.4) \right] + 237.0 \text{ pb}$$

arXiv:1603.02303

Eur. Phys. J. C74 (2014) 3109



Perché migliorare sez. d'urto tt?

→ misura della top quark “pole mass”

- **Re-interpretazione delle misure di sezione d'urto:**

- massa del topmass m_{top} : dipende dallo schema di rinormalizzazione usato

- può essere derivato dalla sezione d'urto con una parametrizzazione (esempio da una misura di cms)

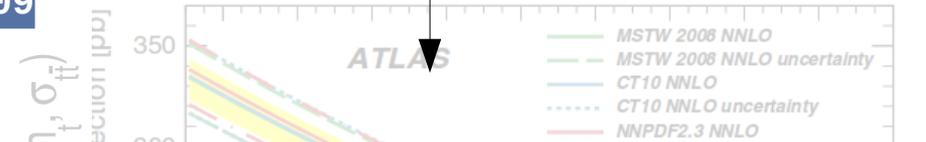
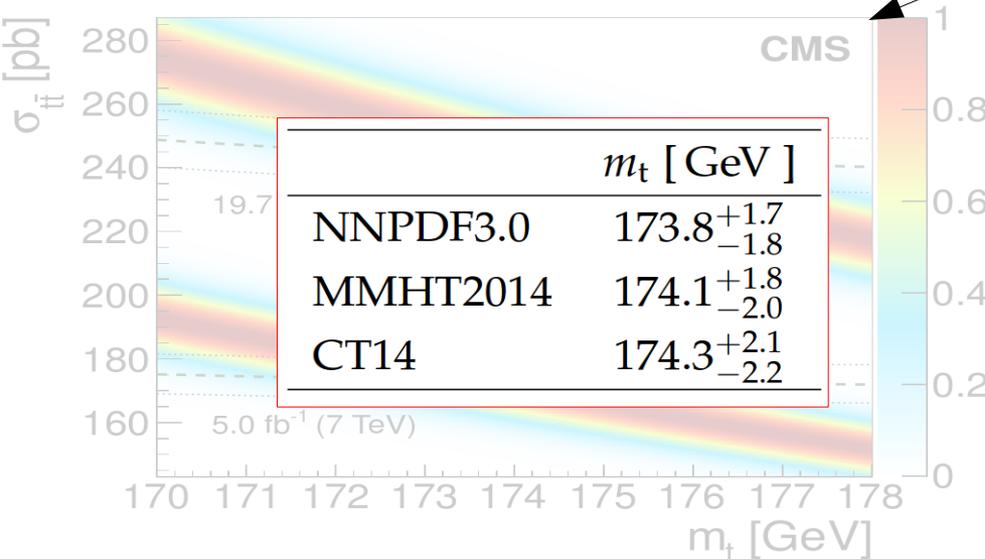
- stesse incertezze della sezione d'urto: luminosità, fondi, ricostruzione dei leptoni

$$\sigma_{t\bar{t}}(7 \text{ TeV}, m_t^{\text{MC}}) = \dots \exp \left[-0.1718 (m_t^{\text{MC}} / \text{GeV} - 178.5) \right] + 170.9 \text{ pb}$$

$$\sigma_{t\bar{t}}(8 \text{ TeV}, m_t^{\text{MC}}) = \dots \exp \left[-0.1603 (m_t^{\text{MC}} / \text{GeV} - 185.4) \right] + 237.0 \text{ pb}$$

arXiv:1603.02303

Eur. Phys. J. C74 (2014) 3109



PDF	m_t^{pole} (GeV) from $\sigma_{t\bar{t}}$	
	$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$
CT10 NNLO	171.4 ± 2.6	174.1 ± 2.6
MSTW 68 % NNLO	171.2 ± 2.4	174.0 ± 2.5
NNPDF2.3 5f FFN	$171.3^{+2.2}_{-2.3}$	174.2 ± 2.4

m_t^{pole} [GeV]

Perché migliorare sez. d'urto tt? → misura delle gluon pdf

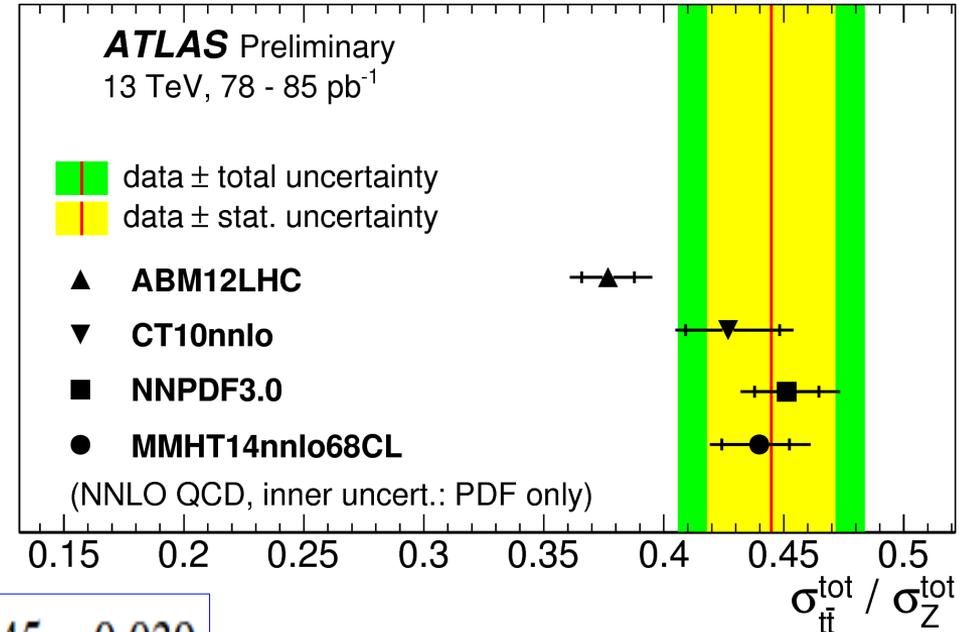
◦ Rapporto sezioni d'urto tt / drell-yan

ATLAS CONF-2015-049

- riduce l'incertezza sulla luminosità
- sensibile al rapporto fra gg e qq , qq

$$R_{t\bar{t}/Z} = \frac{\sigma_{t\bar{t}}}{0.5(\sigma_{Z \rightarrow ee} + \sigma_{Z \rightarrow \mu\mu})} =$$

$$= 0.445 \pm 0.027 \text{ (stat)} \pm 0.028 \text{ (syst)} = 0.445 \pm 0.039$$



Note: è noto che ABM12LHC ha una diversa densità di gluoni

Come migliorare la misura di $t\bar{t}$?

- **Siamo già in regime sistematico a 13 TeV:**

$$\sigma_{t\bar{t}} = 793 \pm 8 \text{ (stat)} \pm 38 \text{ (syst)} \pm 21 \text{ (lumi)} \text{ pb}$$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 803 \pm 7 \text{ (stat)} \pm 27 \text{ (syst)} \pm 45 \text{ (lumi)} \pm 12 \text{ (beam)} \text{ pb}$$

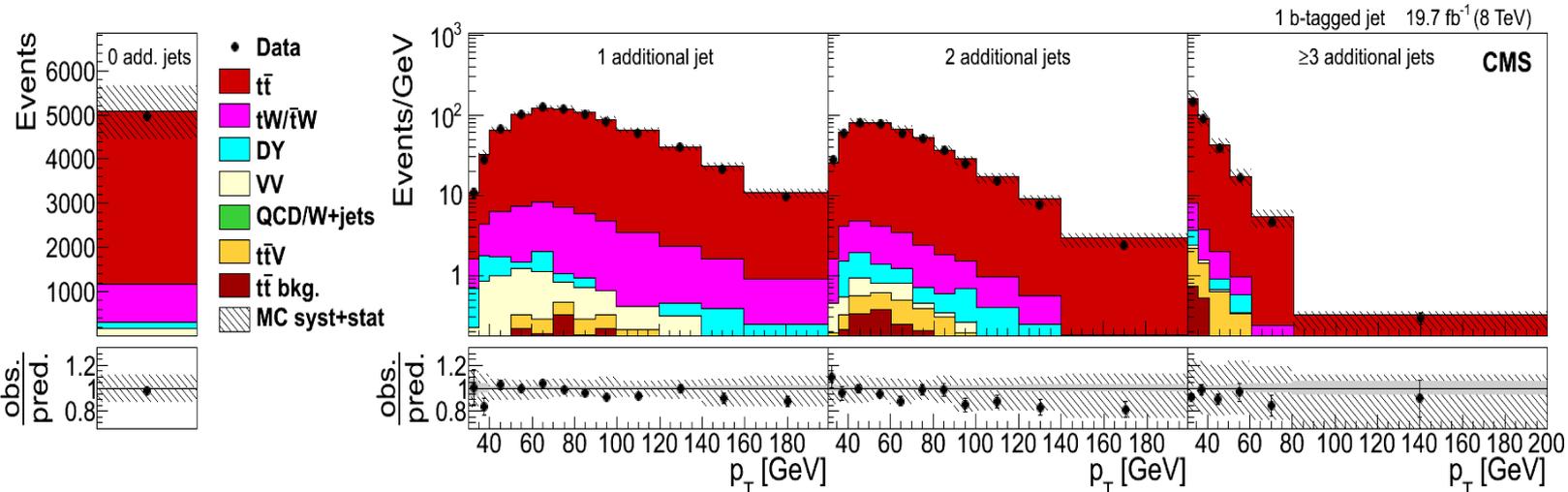
- importante componente delle incertezze proviene dal **modeling $t\bar{t}$ e dalla scala di energia de jet (JES)**

- **Approccio “diretto”**: ottenere le incertezze sistematiche “in situ”:
 - per le JES: molta esperienza su estrazione in situ grazie a misure della massa del top
 - separate in categorie discusse all'interno dell'LHCTopWG
 - per le incertezze **di modeling discorso più delicato**:
 - componente di accettazione e di shape: spesso fattorizzate con **misure fiduciali**
 - interpretazione statistica di alcune incertezze non semplice.
ad es. incertezza di **scala μ_F/μ_R** , o incertezze sul **modello di adronizzazione**
- **Approccio “indiretto”** : sfruttare constrain dei modelli da altre misure, anche nello stesso settore del top!
 - Esempio: misure differenziali della coppia $t\bar{t}$ / dell'underlying event.

Esempi di misure ad alta precisione: “legacy measurements” a 7/8 TeV

◦ Legacy measurement at 8 TeV

arXiv:1603.02303



- fit di profile likelihood fit in diverse regioni
- si usano distribuzioni sensibili alle incertezze di modeling
- si separano gli effetti di accettazione usando uno spazio delle fasi ben delimitato
- incertezze trattate come nuisance parameters con una larghezza lognormale

$$\sigma_{t\bar{t}} = 173.6 \pm 2.1 \text{ (stat)}_{-4.0}^{+4.5} \text{ (syst)} \pm 3.8 \text{ (lumi)} \text{ pb} \quad \mathbf{7 \text{ TeV}}$$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 244.9 \pm 1.4 \text{ (stat)}_{-5.5}^{+6.3} \text{ (syst)} \pm 6.4 \text{ (lumi)} \text{ pb} \quad \mathbf{8 \text{ TeV}}$$

tt da un'altra angolazione: produzione di top ad LHCb

◦ Misura di quark top ad LHCb

Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 112001

- prima osservazione con dati del Run-I in collisioni p-p asimmetriche

- 75% ttbar / 25% top singolo (t-channel)

- eventi con 1 top \rightarrow Wb \rightarrow μ vb

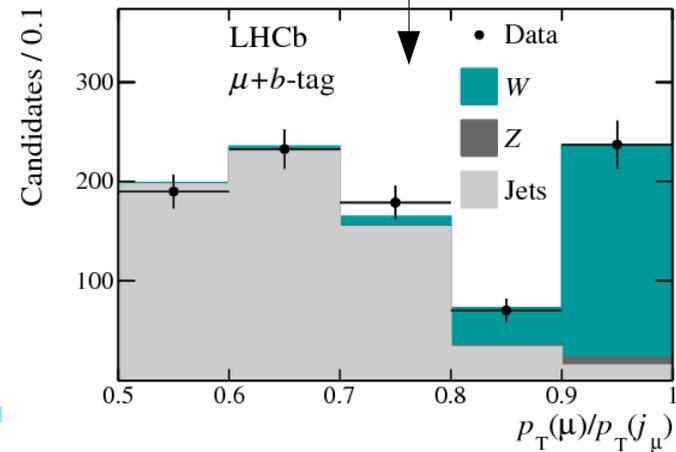
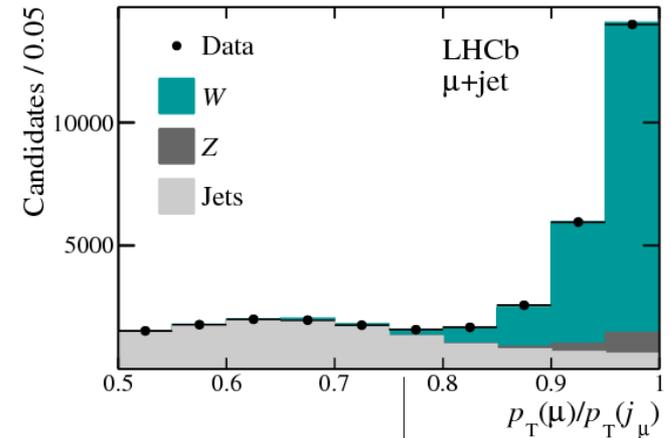
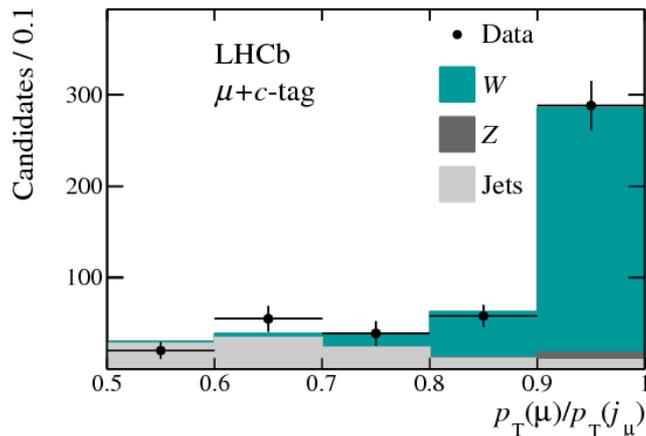
- 1 muone: $p_T > 25$ GeV ; $2.0 < \eta < 4.5$

- ≥ 1 jet $50 < p_T < 100$ GeV ; $2.2 < \eta < 4.2$

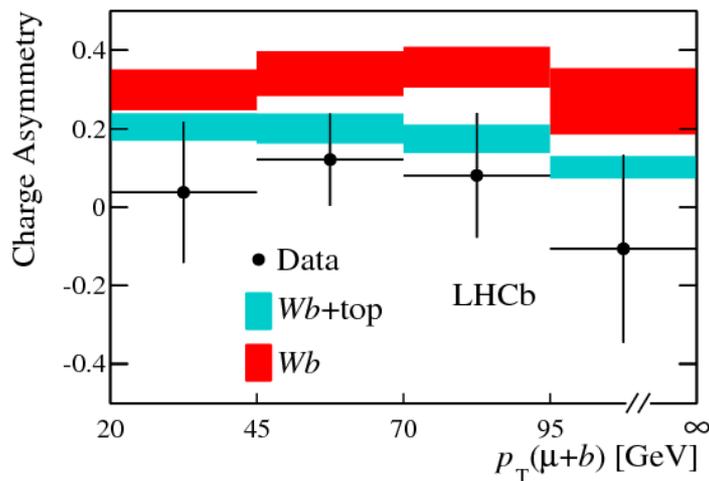
- jet b-tagged

- regione prima del b-tagging usata per ridurre incertezze

- regione di controllo con c-jet



Produzione di top ad LHCb

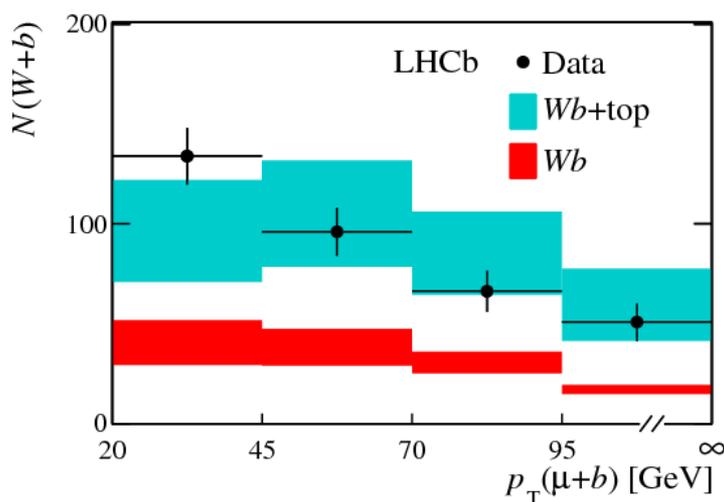


- **Estrazione dei quark top:**

- 2D maximum likelihood fit all'asimmetria di carica e numero di eventi

- consistente con il modello standard, 5.4 deviazioni standard di significatività

- Incertezze principali: b-tagging, teoria



$$\sigma(\text{top})[7 \text{ TeV}] = 239 \pm 53 (\text{stat}) \pm 33 (\text{syst}) \pm 24(\text{theory}) \text{ fb}$$

$$\sigma(\text{top})[8 \text{ TeV}] = 289 \pm 43 (\text{stat}) \pm 40 (\text{syst}) \pm 29(\text{theory}) \text{ fb}$$

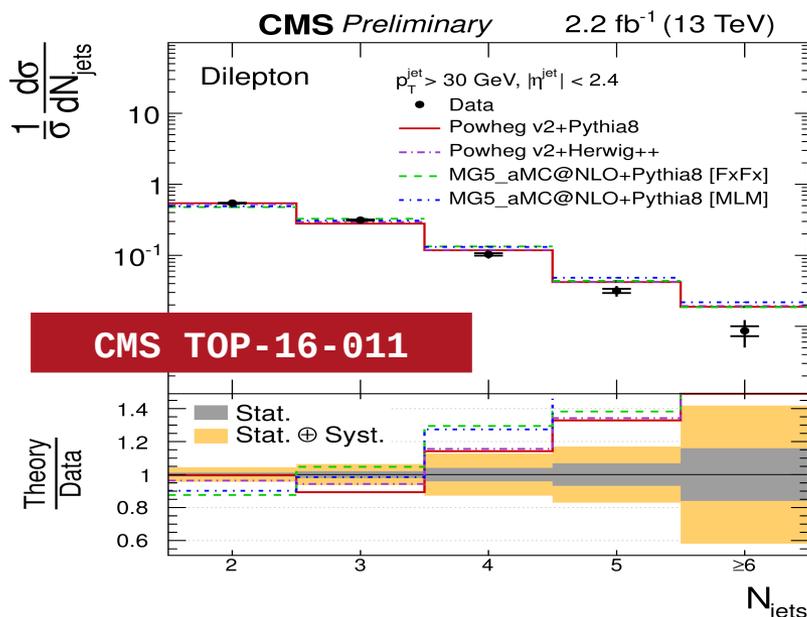
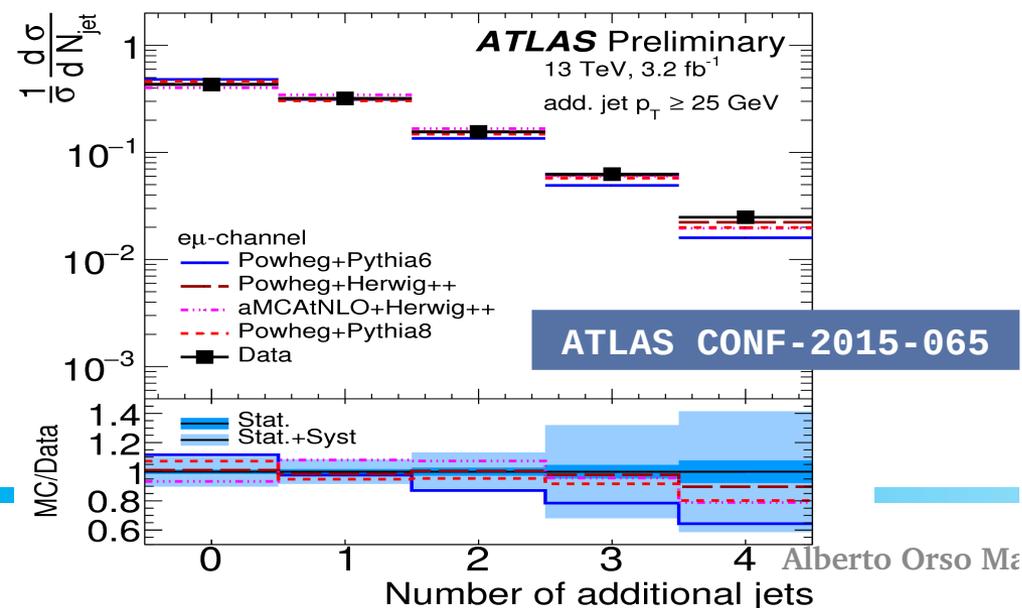
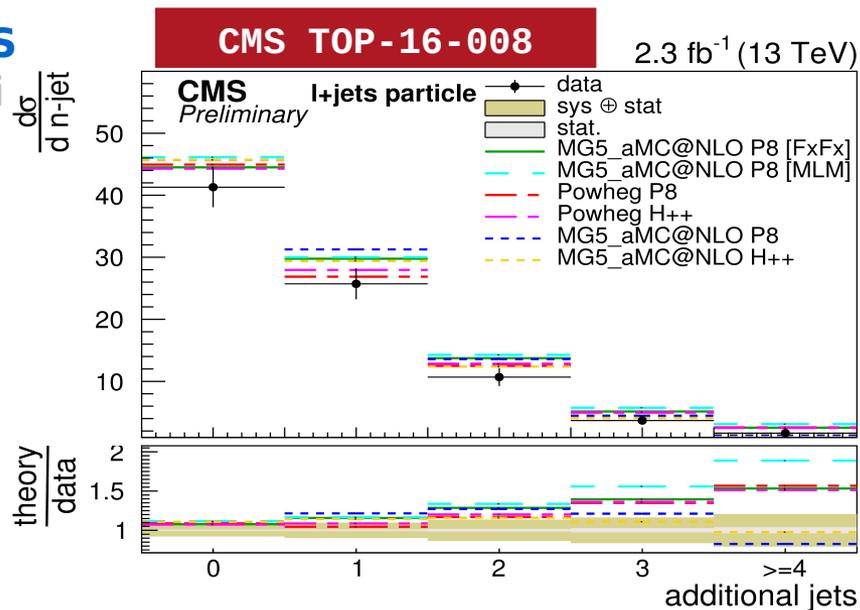
Phys.Rev.Lett.115(2015)112001

Produzione di coppie $t\bar{t}$:
misure differenziali come banco di
prova della QCD SM

Produzione associata tt + jets

- **Studio degli elementi di matrice e del PS** dipende dal numero di jets aggiuntivi prodotti assieme alla coppia tt

- Stessa selezione delle analisi semileptonica o dileptonica, selezionando la migliore ipotesi di ttbar a partire dai leptoni/jet

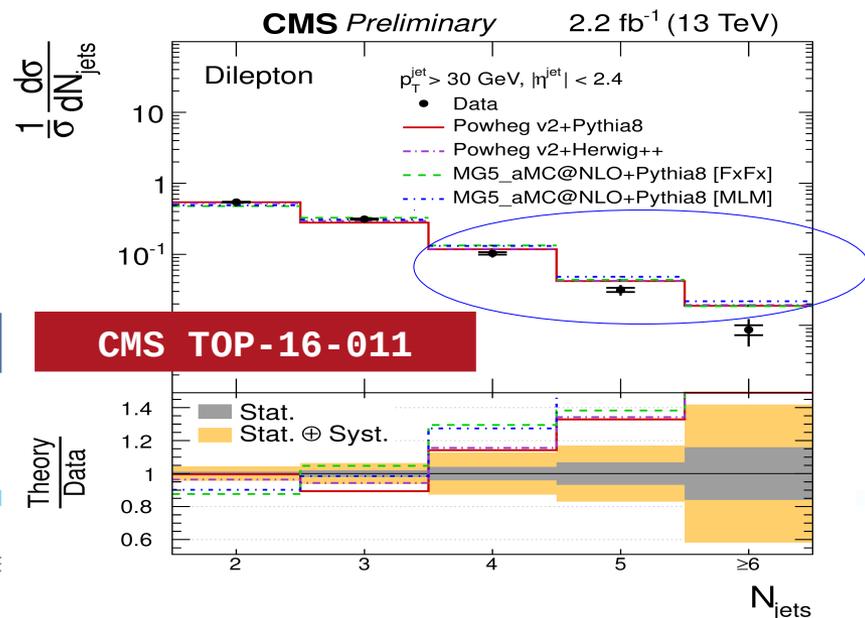
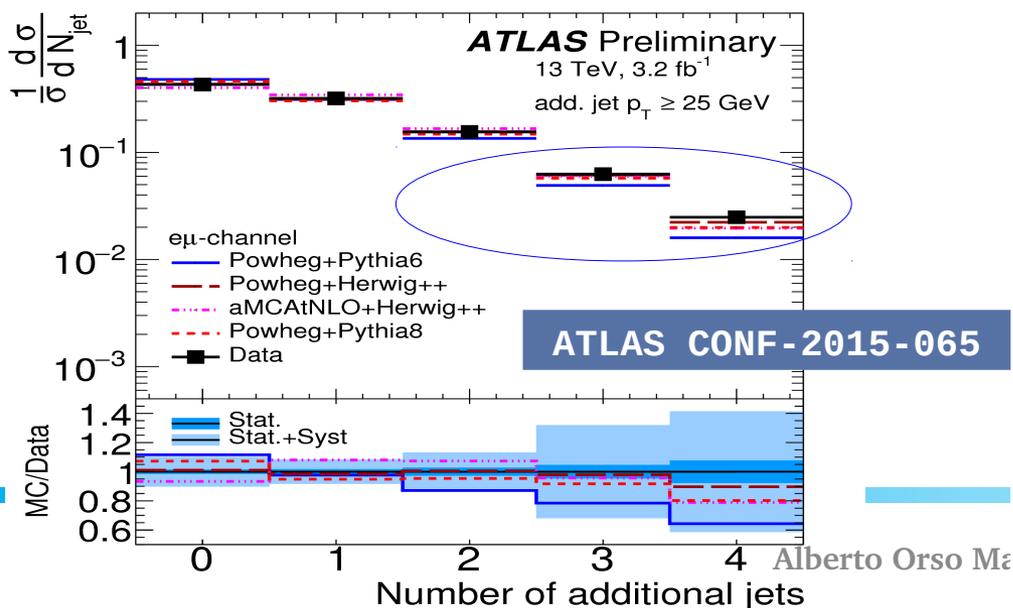
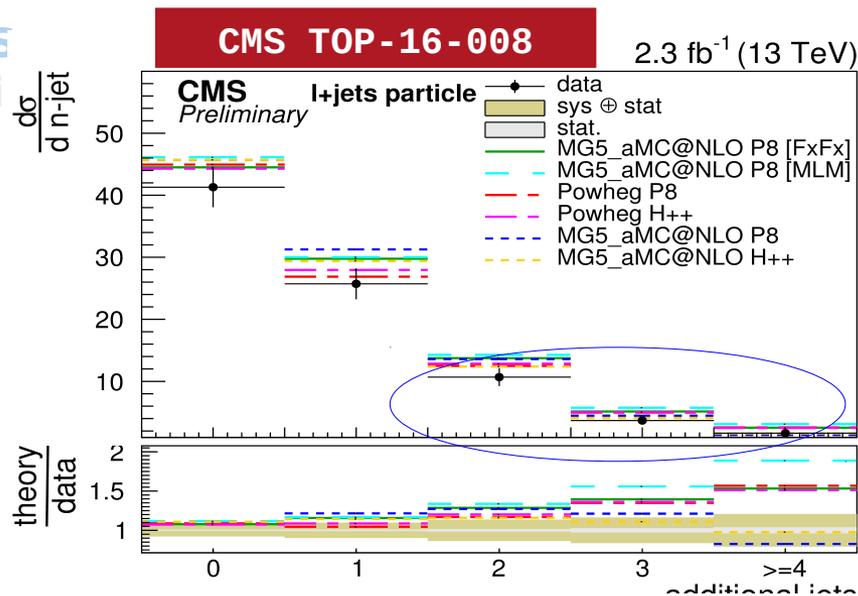


Produzione associata tt + jets

◦ **Studio degli elementi di matrice e del PS** dipende dal numero di jets addizionali prodotti assieme alla coppia tt

- Stessa selezione delle analisi semileptonica o dileptonica, selezionando la migliore ipotesi di ttbar a partire dai leptoni/jet

- Alta molteplicità di jet aggiuntivi: dominata dal *Parton Showering*

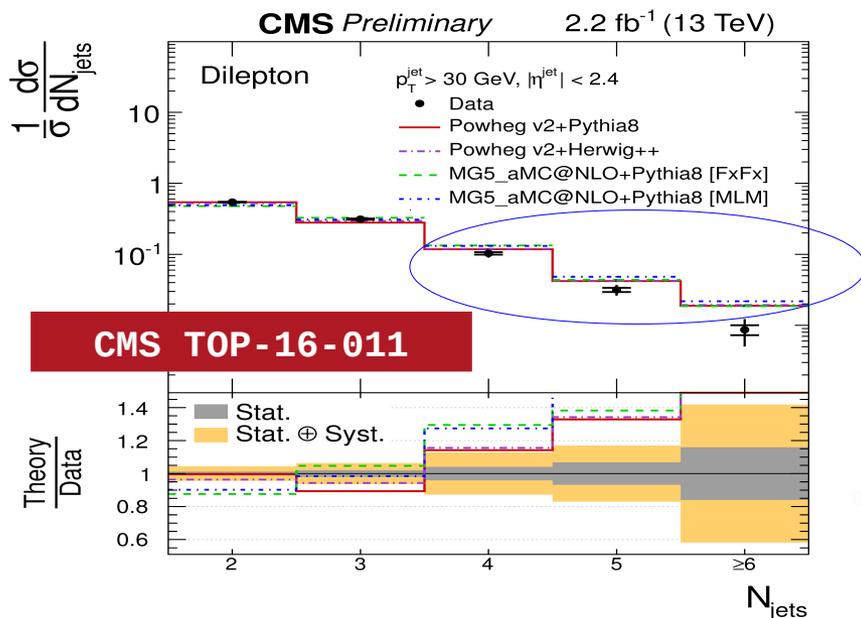
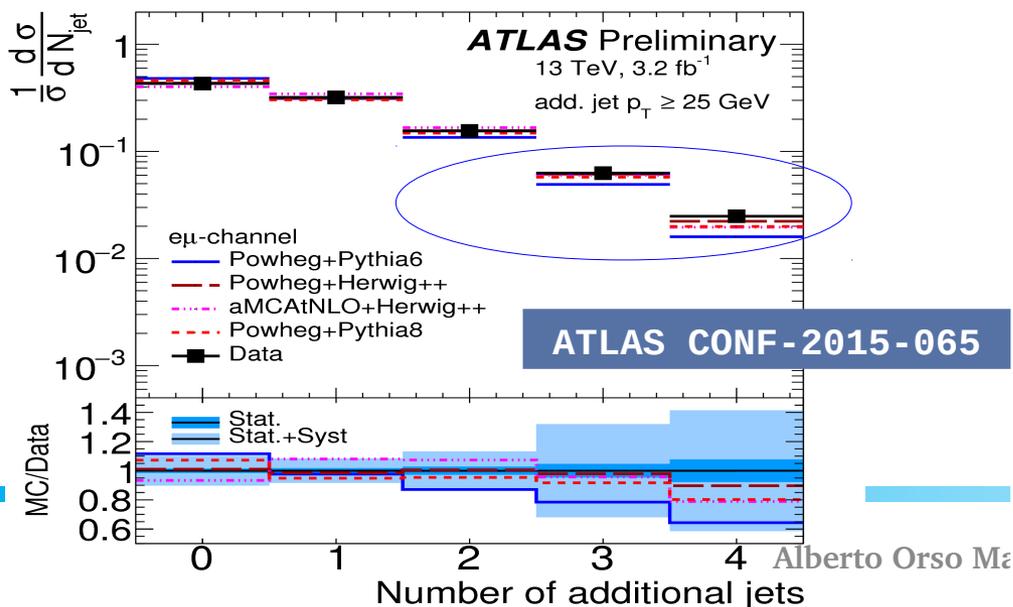
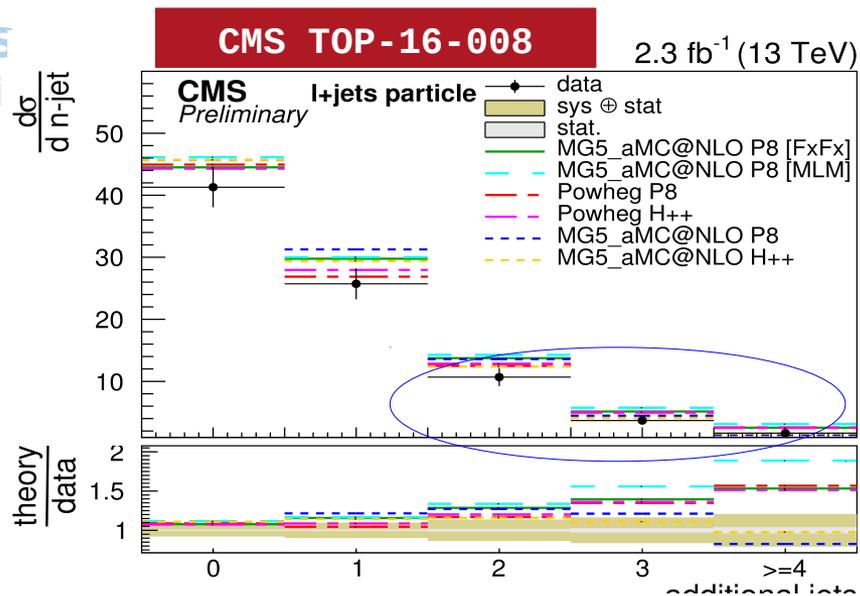


Produzione associata tt + jets

◦ **Studio degli elementi di matrice e del PS** dipende dal numero di jets addizionali prodotti assieme alla coppia tt

- Stessa selezione delle analisi semileptonica o dileptonica, selezionando la migliore ipotesi di ttbar a partire dai leptoni/jet

- Alta molteplicità di jet aggiuntivi: dominata dal *Parton Showering*
 --> Può fornire indicazioni sulla scala μ_f da scegliere per le PS!



Sezione d'urto differenziale tt: funzione delle proprietà cinematiche

- **Proprietà cinematiche:**

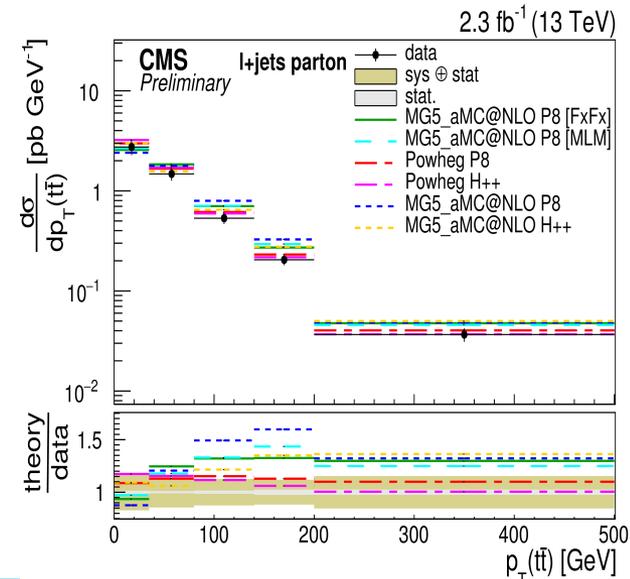
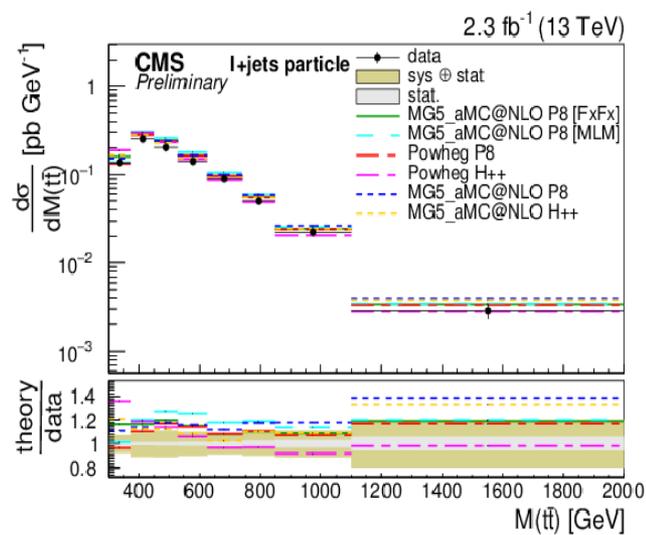
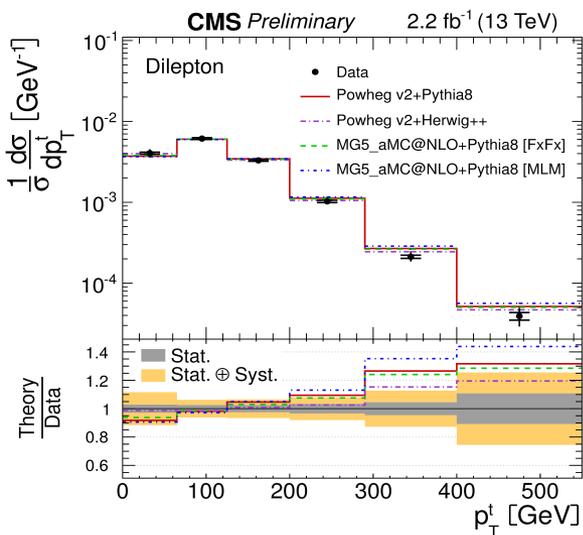
- permette il modeling della parte “Matrix Element” della simulazione

CMS TOP-16-008

CMS TOP-16-011

- sensibile a QCD in ordini perturbativi superiori

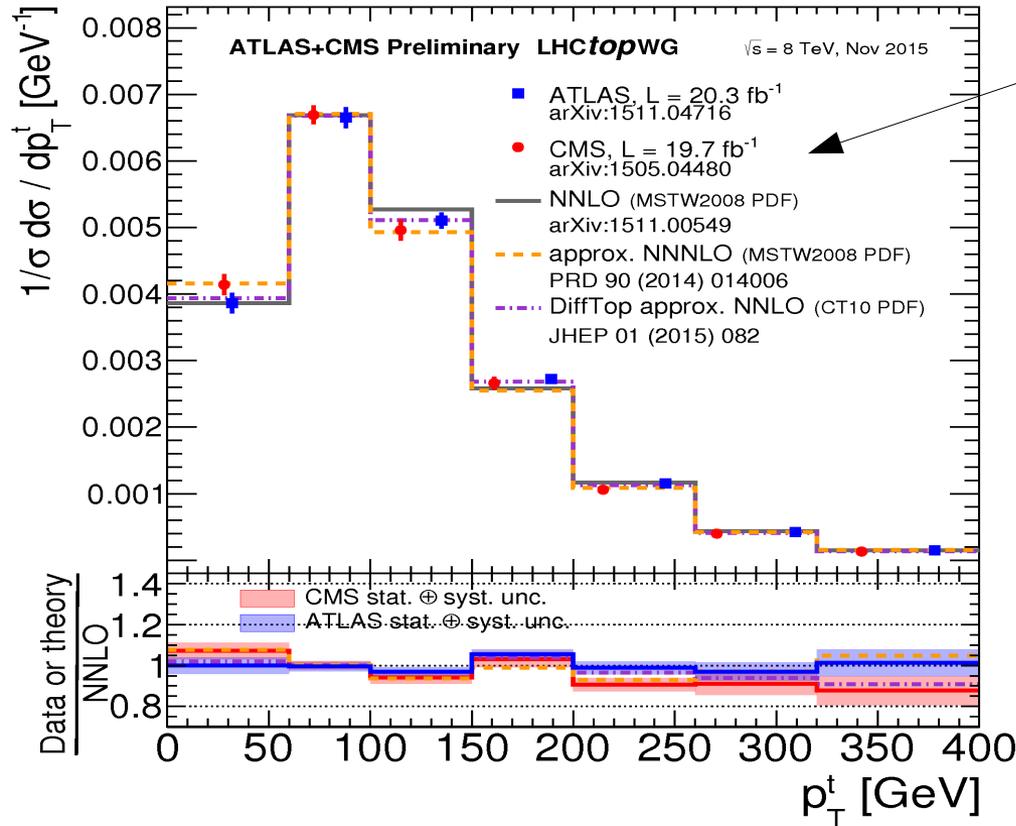
- sensibile a nuova fisica negli spettri differenziali
 - e.g. la massa della coppia tt



Cosa impariamo da queste misure?

Confronto con NNLO

- **Run-I** differenza tra il momento trasverso misurato del top p_T e lo spettro previsto dalle simulazioni



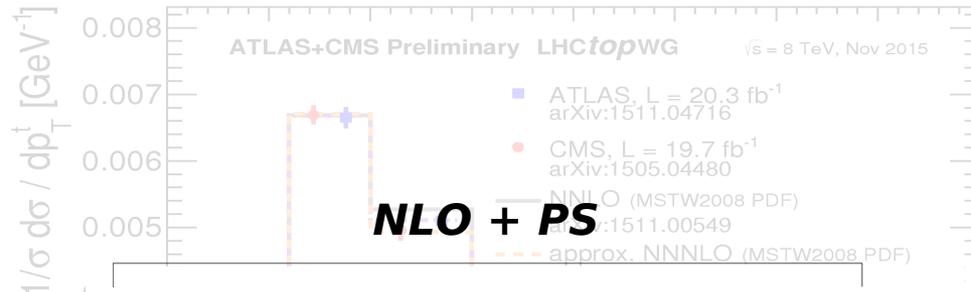
- Accordo migliore con le recenti previsioni QCD al NNLO.

LHC Top WG summary plots

Cosa impariamo da queste misure?

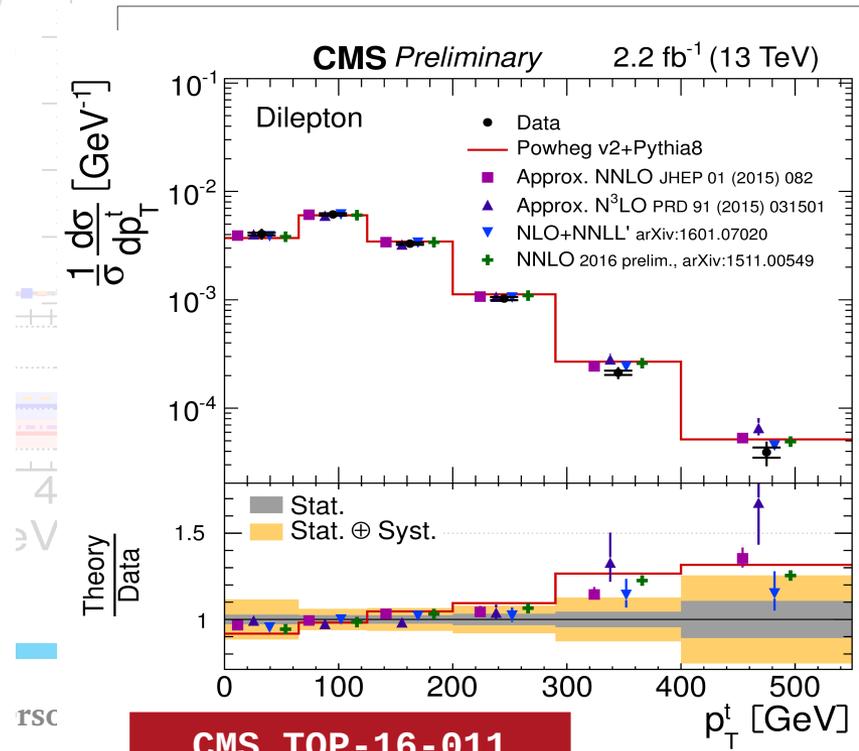
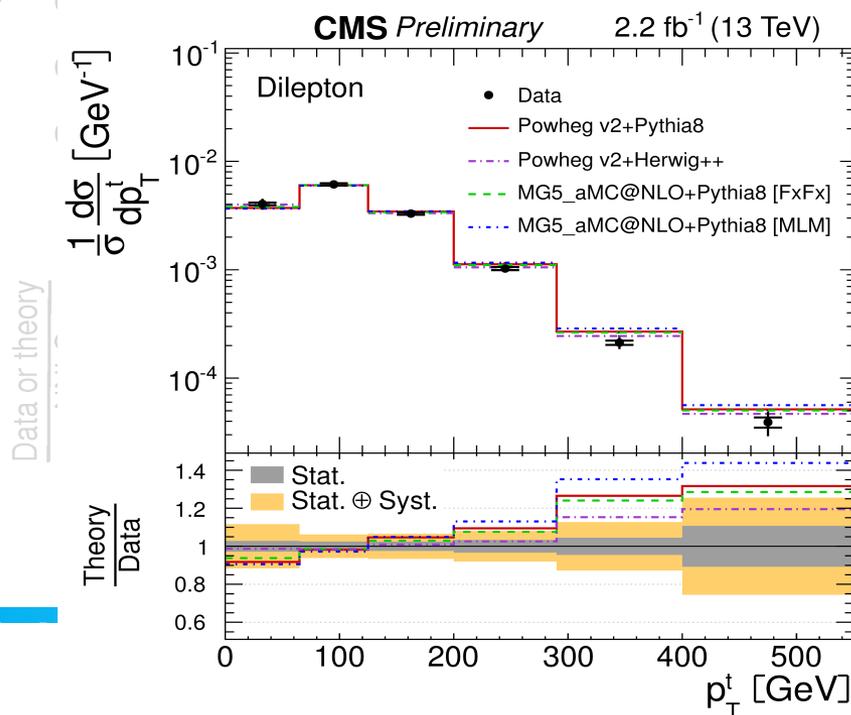
Confronto con NNLO

- **Run-I** differenza tra il momento trasverso misurato del top p_T e lo spettro previsto dalle simulazioni



- Accordo migliore con le recenti **previsioni QCD al NNLO.**
- confronto anche a **13 TeV:**

NNLO



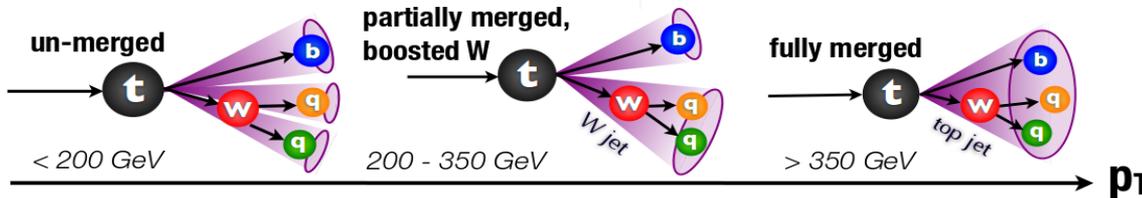
Top nel regime “boosted”: cosa accade ad alte energie?

◦ **All'aumentare dell'energia:** top quark prodotti a momento non trascurabile rispetto alla massa!

- Jet del decadimento non “risolvibili”: **regime boosted**

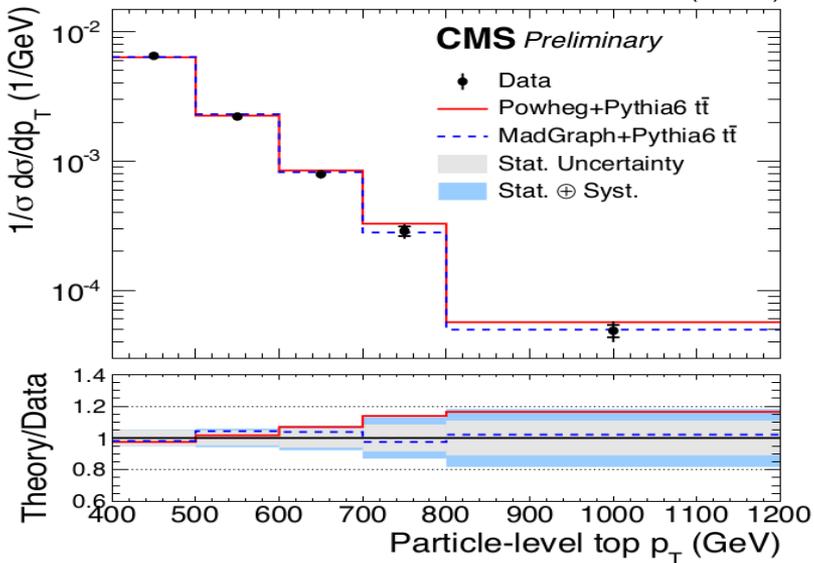
► Più **sensibile** a fisica **non-standard model!**

Sonda per **pdf di gluoni** “ad alto x”

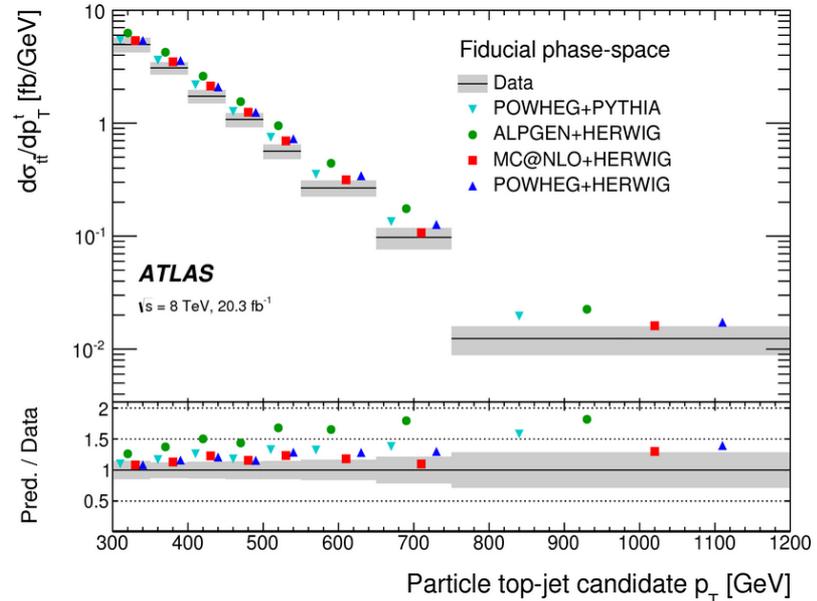


Phys. Rev. D 93, 032009

19.7 fb⁻¹ (8 TeV)



CMS TOP-14-012



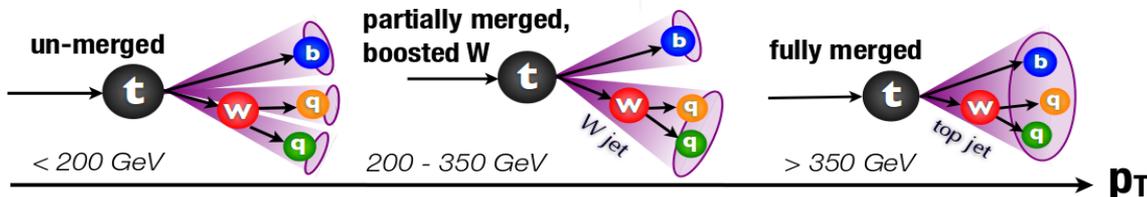
Top nel regime “boosted”: cosa accade ad alte energie?

◦ **All'aumentare dell'energia:** top quark prodotti a momento non trascurabile rispetto alla massa!

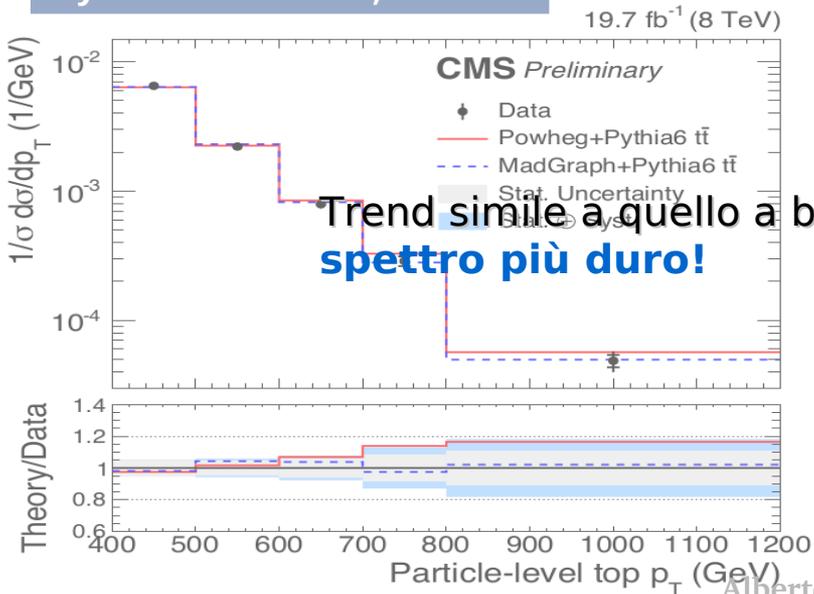
- Jet del decadimento non “risolvibili”: **regime boosted**

➔ Più **sensibile** a fisica **non-standard model!**

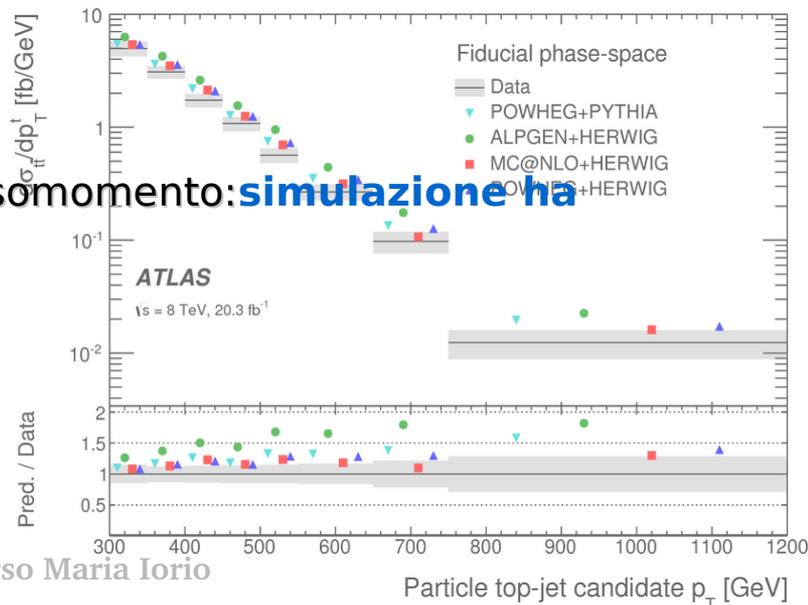
Sonda per **pdf di gluoni** “ad alto x”



Phys. Rev. D 93, 032009



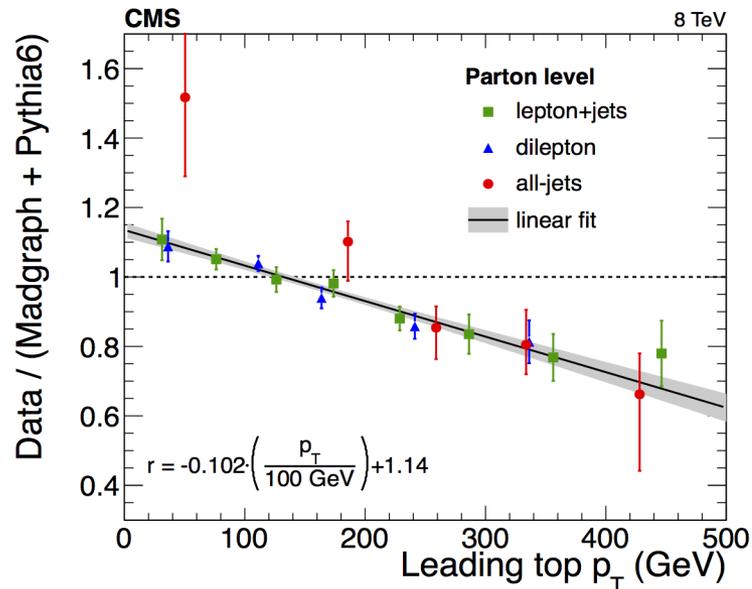
CMS TOP-14-012



Come sfruttare questa informazione?

- **Approcci diversi al problema:**

- **CMS** usa **un ripesamento** che sfrutta le misure differenziali a partire dal momento del quark top:



- **Atlas** non considera nessun ripesamento, ma li considera tra gli effetti inclusi nelle incertezze deò MC Next-to-Leading-Order.

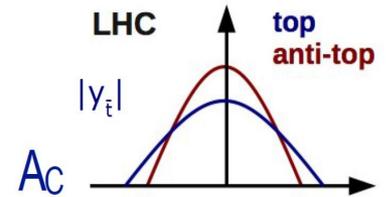
--> tenendo conto delle correlazioni l'effetto è < 2 deviazioni standard.

Asimmetria di carica in coppie tt

- **Asimmetria in produzione top-antitop:**

- ad LHC: come differenza in spettri di rapidità

- top quark prodotto più in avanti rispetto all'antitop



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

Asimmetria di carica in coppie tt

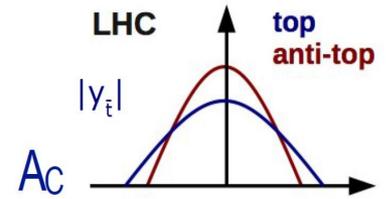
- **Asimmetria in produzione top-antitop:**

- ad LHC: come differenza in spettri di rapidità

- top quark prodotto più in avanti rispetto all'antitop

- **Misura di precisione a 7/8 TeV:**

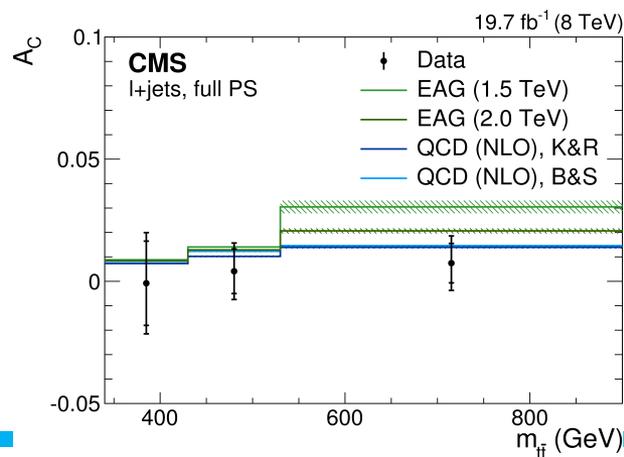
- in diversi canali, includendo il regime boosted



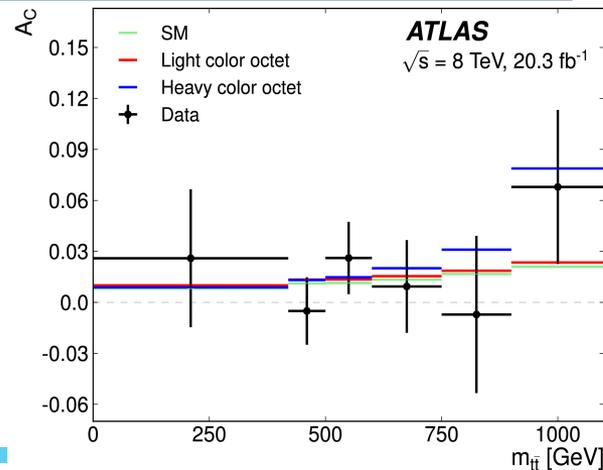
$$A_C = \frac{N(\Delta|y| > 0) - N(\Delta|y| < 0)}{N(\Delta|y| > 0) + N(\Delta|y| < 0)}$$

$$\Delta|y| = |y_t| - |y_{\bar{t}}|$$

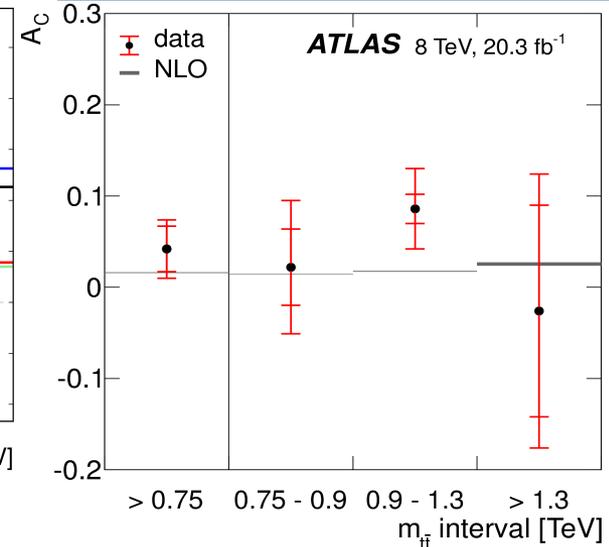
arXiv:1507.03110



Eur. Phys. J. C76 (2016) 87



Phys. Lett. B (2016) 756, 52-71

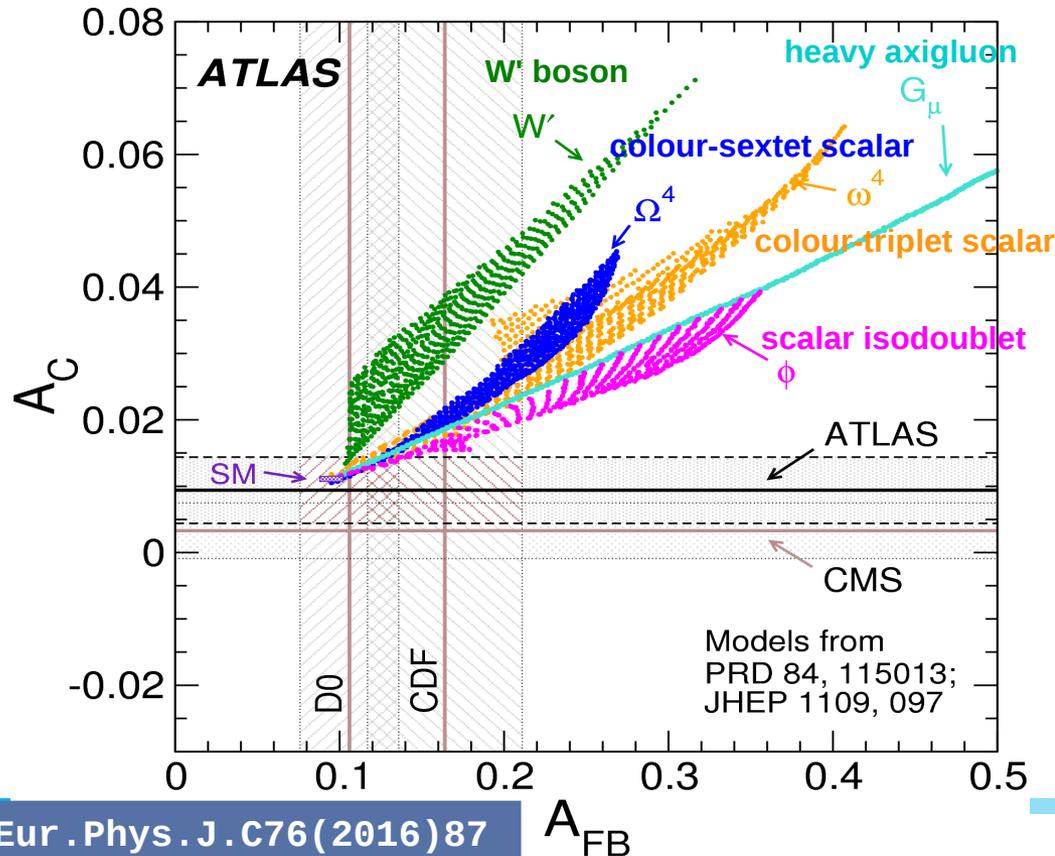


Asimmetria di carica in coppie tt

◦ **Nessuna deviazione dal comportamento atteso**

- Vasta gamma di misure da Atlas e CMS

- Numerosi modelli BSM esclusi

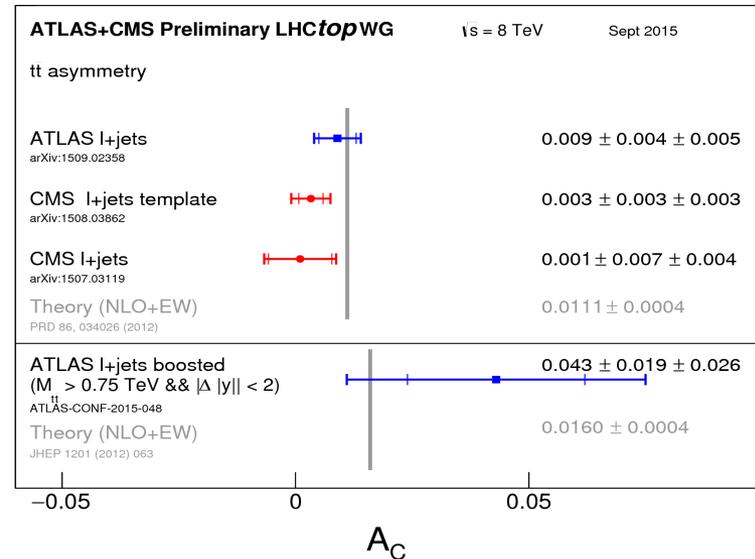
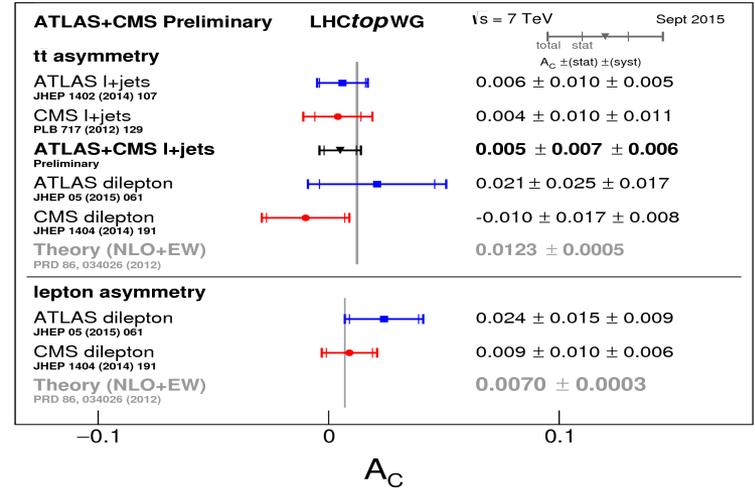


Eur. Phys. J. C76(2016)87

A_{FB}

Alberto Orso Maria Ioi

LHC Top WG summary plots



top singoli e produzione associata di bosoni vettori

Il settore elettrodebole del top: produzione di top singoli

- **Quark top singolo:**

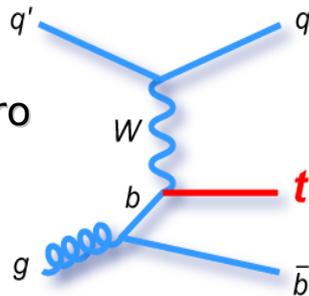
- **Vertice tWb nella produzione**

- Top è prodotto polarizzato

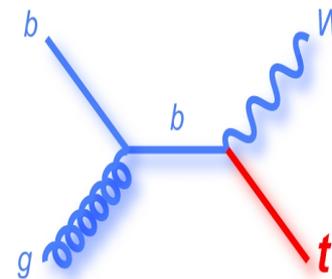
- accoppiamenti non SM potrebbero manifestarsi in sezione d'urto e proprietà degli eventi.

- Sezione d'urto di tutti i canali proporzionale a $|V_{tb}|^2$

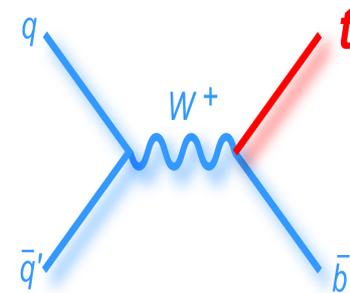
canale t



associato a W (tW)



canale s



LHC pp @ 7 TeV⁽¹⁾⁽²⁾

63.9±0.2.7 pb

15.7±1.2 pb

4.29±0.18 pb

LHC pp @ 8 TeV⁽¹⁾⁽²⁾

85.2±2.2 pb⁽³⁾

22.4±1.5 pb

5.24±0.21 pb

LHC pp @ 13 TeV⁽¹⁾⁽²⁾

217.0±8.4 pb

84.4±4.4 pb

10.32±0.38 pb

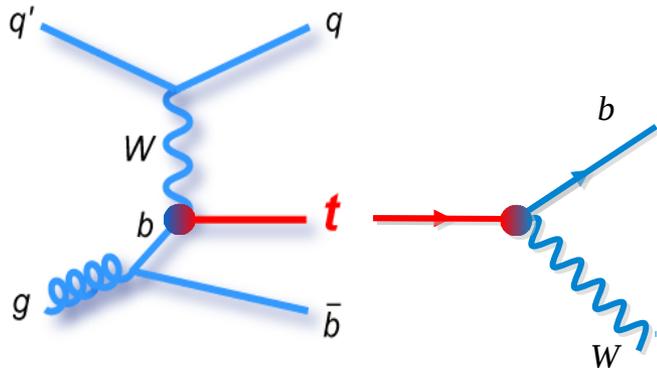
(1): LHCTopWG: calculations with HATOR, see also <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/SingleTopRefXsec>

(2): N. Kidonakis Phys. arXiv:1205.3453

(3): M. Burcherseifer, F.Caola, K. Melnikov: arXiv:1404.7116

Con massa del top = 172.5 GeV

canale t : verso l'era a 13 TeV



- **Produzione più abbondante ($\sigma \sim 1/3 \times \sigma(tt)$):**
- **misura di V_{tb} in produzione!**

◦ Sez. d'urto inclusive

- leptonic only decay channels

- Analisi multivariate per discriminare i fondi

- Selezione:

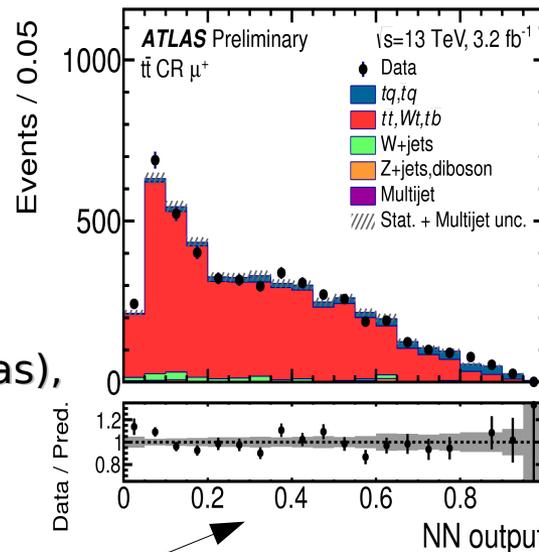
-- 1 leptone (μ per CMS, μ/e per atlas),

- 2 or 3 jet

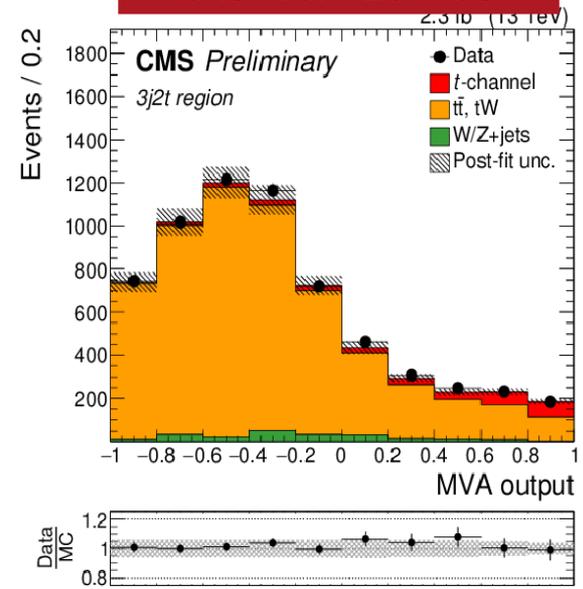
- 1 or 2 b-jet

- Si usano regioni di controllo per i fondi principali (e.g. produzione tt)

ATLAS CONF-2015-079



CMS TOP-16-003



canale t : sezioni d'urto e $|V_{tb}|$

Sezioni d'urto:

$\sigma_{t\text{-channel}}$ [pb]

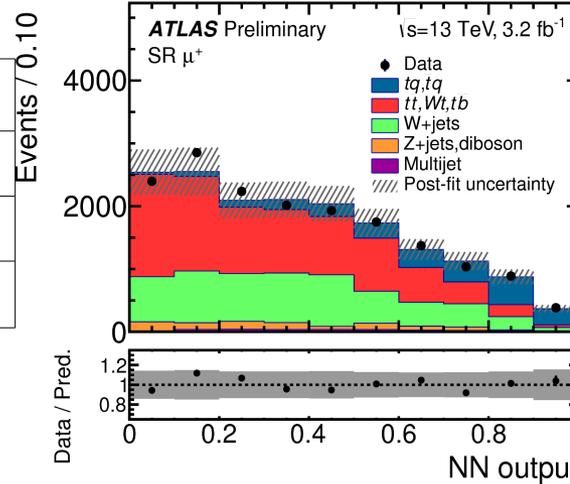
	Atlas	CMS
7 TeV	68 ± 8	67.2 ± 6.1
8 TeV	82.6 ± 12.1	83.6 ± 7.8
13 TeV	229 ± 48	227 ± 33

$|V_{tb}|$: assumendo $|V_{td}|, |V_{ts}| \ll |V_{tb}|$

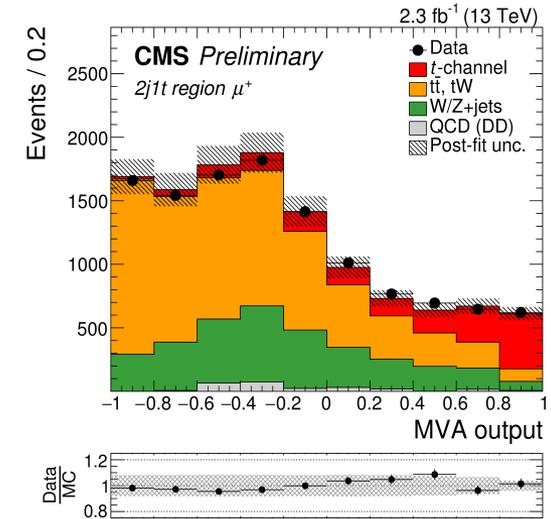


$$|V_{tb}| = \sqrt{(\sigma_{t\text{-ch.}}^{\text{obs.}} / \sigma_{t\text{-ch.}}^{\text{theo.}})}$$

	Atlas	CMS
7 TeV	1.02 ± 0.07	1.02 ± 0.05
8 TeV	0.97 ± 0.09	0.978 ± 0.04
13 TeV	1.03 ± 0.11	1.02 ± 0.07



ATLAS CONF-2015-079



CMS TOP-16-003

Incertezze principali su $\sigma_{t\text{-chan. l}}(t, 13\text{TeV})$ [%]

	Atlas	CMS
μ_f/μ_r segnale	5.9	+5.1 -7.1
Modello segnale	11.0	10.1
Scala di energia jet	5.5	5.7

canale t , what's next?

◦ **Misure limitate modeling e jES:**

- A più alta statistica: fit in situ delle componenti JES

- Problematica simile al caso tt :

	Atlas	CMS
μ_f/μ_r segnale	5.9	+5.1 -7.1
Modello segnale	11.0	10.1
Scala di energia jet	5.5	5.7

- Diventerà fondamentale costringere **incertezze in-situ**

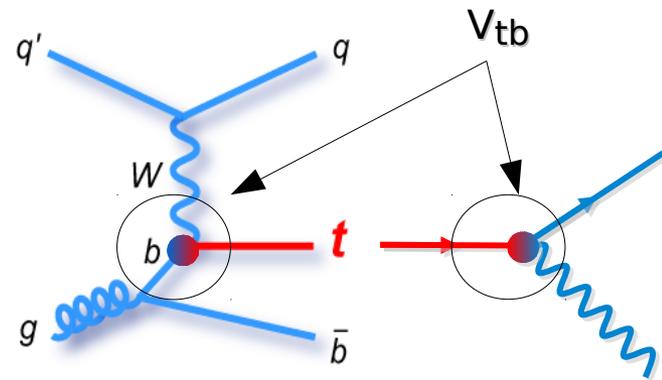
- Studio di singole variabili meno **model dependent o dalla chiara interpretazione fisica per l'estrazione del segnale**

◦ **Misura di V_{tb} ad alta precisione:**

- V_{tb} da considerare in produzione e in decadimento

- V_{td} e V_{ts} non necessariamente trascurabili!

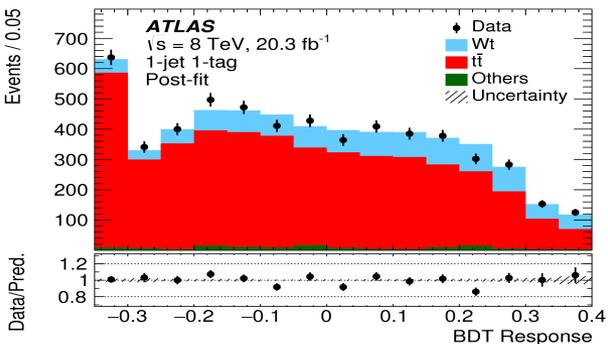
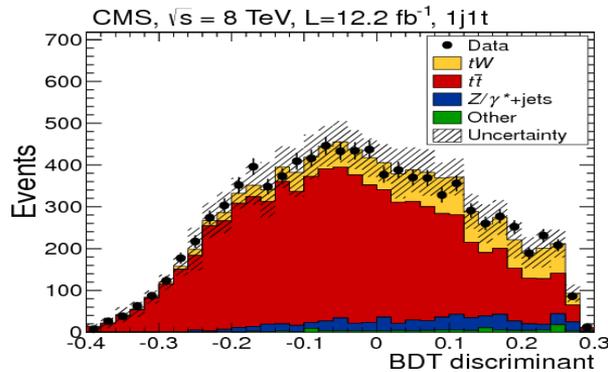
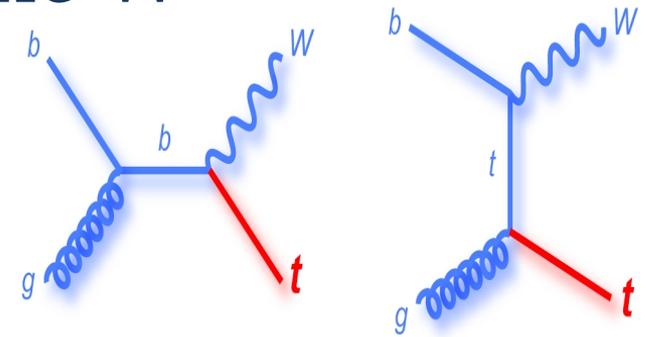
- Misura solo la componente VL anomala!
 - misure differenziali/angolari necessarie per la struttura del vertice tWb



top singolo con produzione associata a bosone W

- **Meccanismo di produzione diverso:**

- maniera complementare di studiare le proprietà del vertice tWb rispetto al canale t



- **Misure ad LHC ad 8 TeV :**

- In canali dove sia t che W decadono in leptoni:
2 leptoni isolati a segno opposto nello stato finale.

$$\sigma_{(8 \text{ TeV})} [\text{pb}] = 23.0 \pm 3.6(\text{Atlas}) / 23.4 \pm 5.4 (\text{CMS})$$

- Incertezze principali:

Atlas: Normalizzazione dei fondi ($+^{10}_{-8.5}\%$),
scala di energia dei jet ($+^{9.0}_{-9.9}\%$), ISR/FSR ($+^{8.2}_{-9.4}\%$);

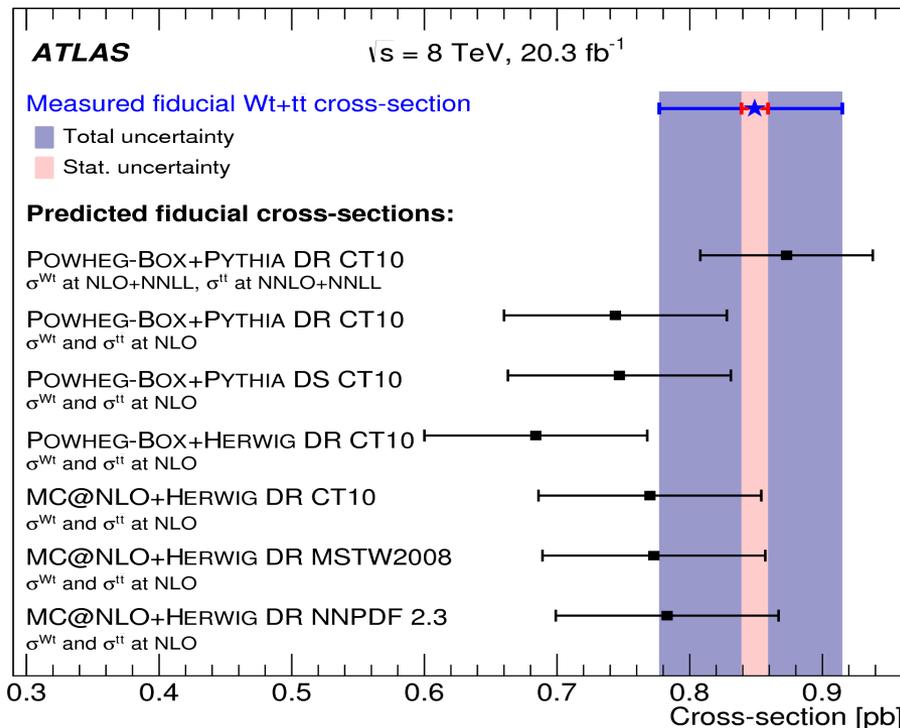
CMS: matching di Parton Showering/ ME per tt (14%),
 μ_F / μ_R (11%), massa del quark top (11%);

Il futuro del canale tW: interferenza con tt e misure fiduciali

- **Al NLO: tt e tW non sono separabili**

- nella simulazione di tW: due diversi schemi per rimuovere i diagrammi comuni tt / tW

- trattamento che include interferenza WWbb: chiaro a livello teorico, manca ancora matching con PS



- **Misure fiduciali :**

- Permettono di guardare nello spazio delle fasi dove la differenza tra tW e tt è maggiore

Atlas: misura della sezione d'urto fiduciale in diverse condizioni

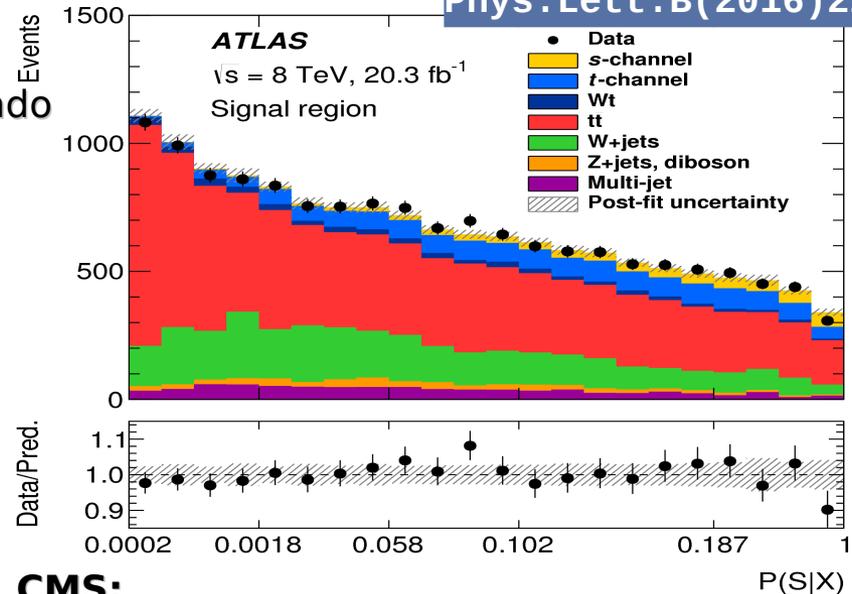
- molto importante effettuare questa misura anche avremo con il trattamento proprio WWbb

JHEP01(2016)064

top singolo nel canale s

- **Prima evidenza del canale s:**
 - selezione con 1 leptone e 2 b-jet
 - metodo matrix element per discriminare dal fondo
 - fit di profile likelihood che tratta sistematiche come parametri di nuisance

Phys. Lett. B (2016) 228-246



CMS:

• canale s a 7 + 8 TeV:

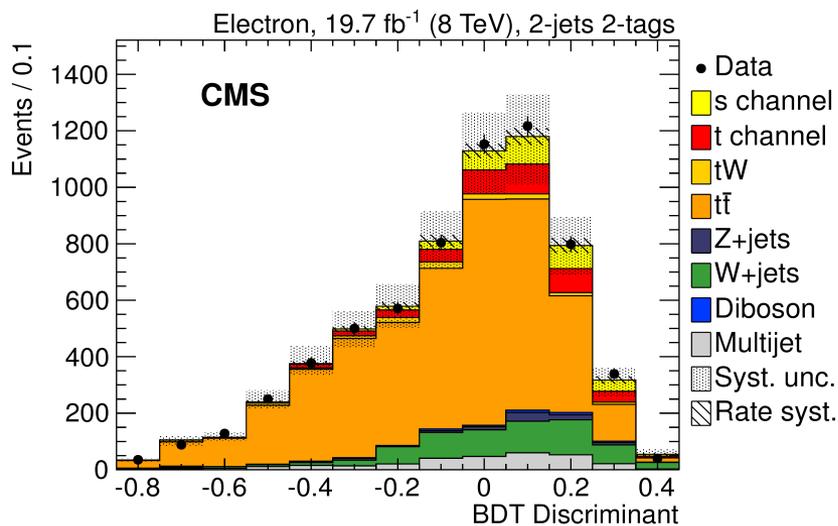
- analisi multivariata per discriminare i fondi
- significatività ottenuta correlando i risultati ad entrambe le energie
- Nessun profiling delle sistematiche
- Dominati dall'incertezza sul modello di fondo

$$\sigma_s = 7.1 \pm 8.1 \text{ (stat + syst) pb, } 7 \text{ TeV;}$$

$$\sigma_s = 13.4 \pm 7.3 \text{ (stat + syst) pb, } 8 \text{ TeV.}$$

$$\sigma_s = 4.8 \pm 0.8 \text{ (stat.)}_{-1.3}^{+1.6} \text{ (syst.) pb}$$

Significatività (attesa)/osservata
(3.9)3.2 deviazioni standard



arXiv:1603.02555

Misure di spin ed elicità, violazione di cp

Spin e polarizzazione del top

- **Molte metodologie di misura! Nelle coppie tt**

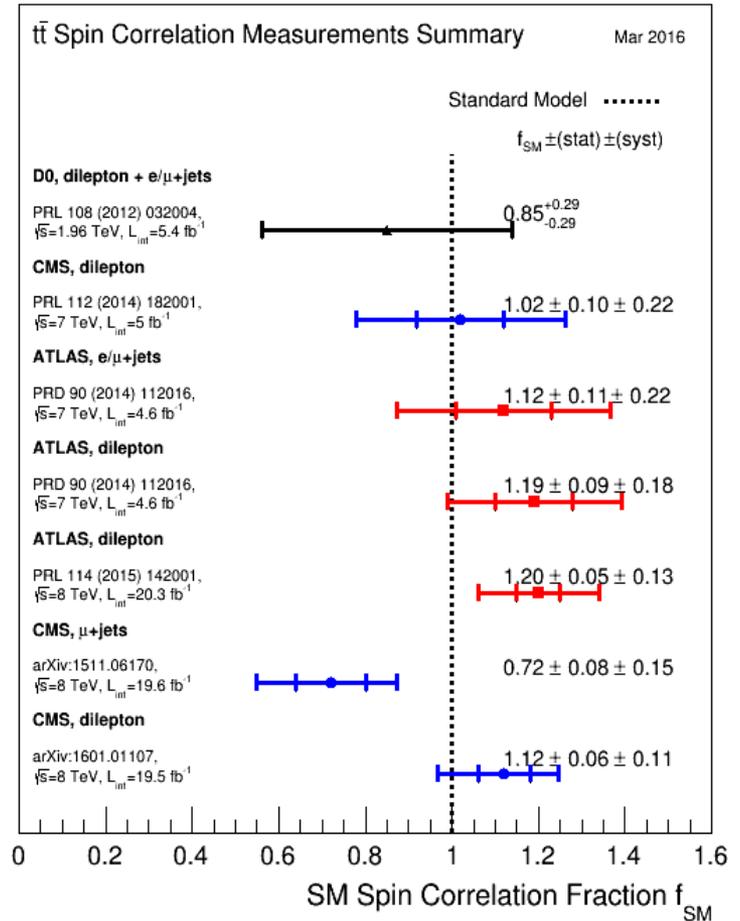
- Diversi canali: semileptonico e dileptonico

- Diverse osservabili: $\Delta\phi$, $\cos\theta^*$, etc.

- Utilizzato anche il Matrix Element Method

- Buon accordo con il modello standard, solo due misure mostrano deviazioni, comunque entro 2σ

- **Misure possibili anche nel single-top, laddove il top è polarizzato!**



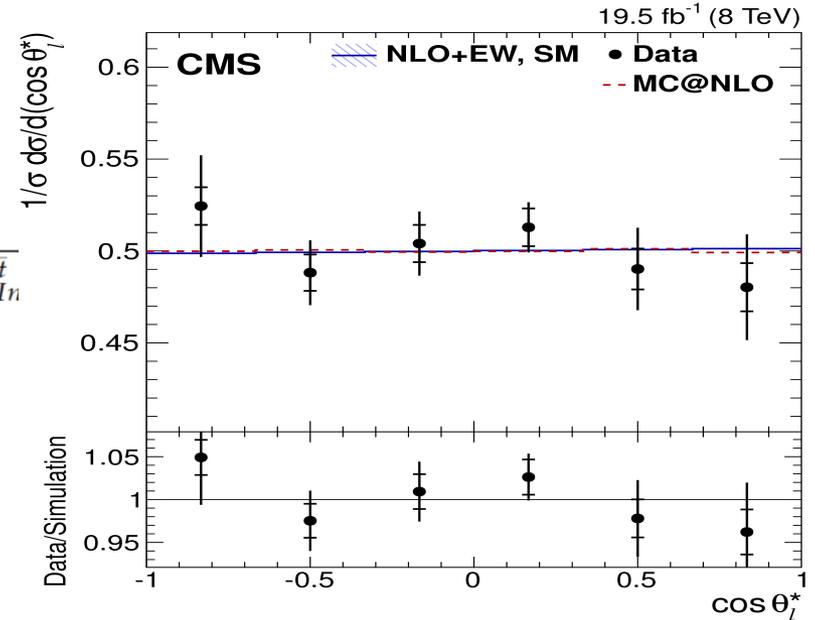
Spin e polarizzazione del top nel tt

- **Produzione forte di quark top:**

- prodotti praticamente non polarizzati
- correlazioni angolari derivano dall'elicità dei gluoni

- **Come si misura:**

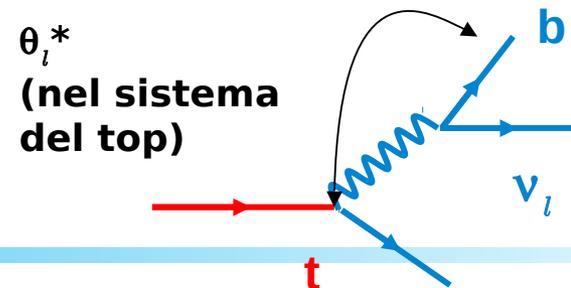
- frazione di eventi con *spin-correlation* $f_{SM} = \frac{N_{SM}^{t\bar{t}}}{N_{SM}^{t\bar{t}} + N_{Un}^{t\bar{t}}}$
- Si effettua l'unfolding a livello del generatore per misurare le asimmetrie



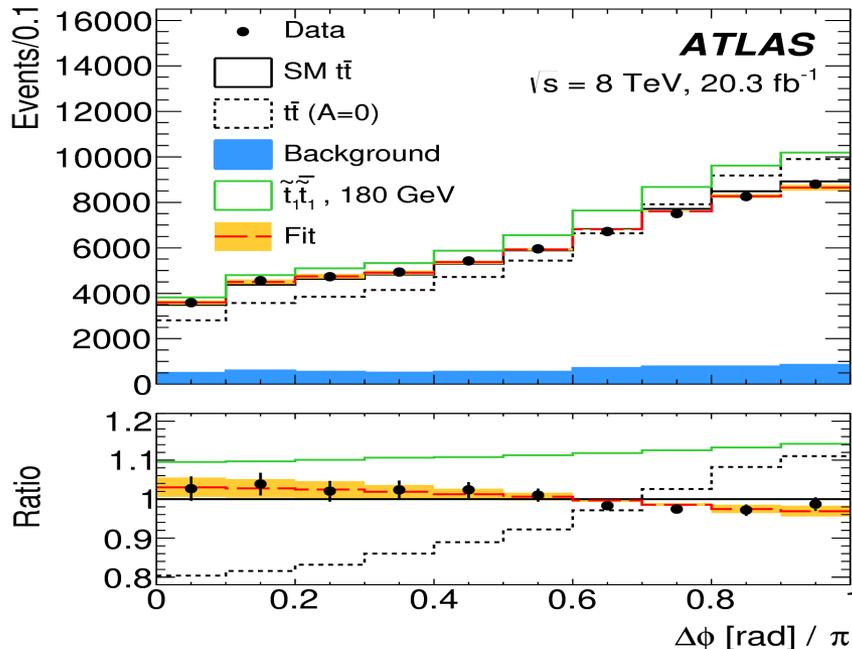
arXiv:1601.01107

- **Osservabili:**

- angolo θ^* per i decadimenti leptonici
- angolo ϕ tra i due leptoni nel caso dileptonico



Phys. Rev. Lett. 114, 142001 (2015)

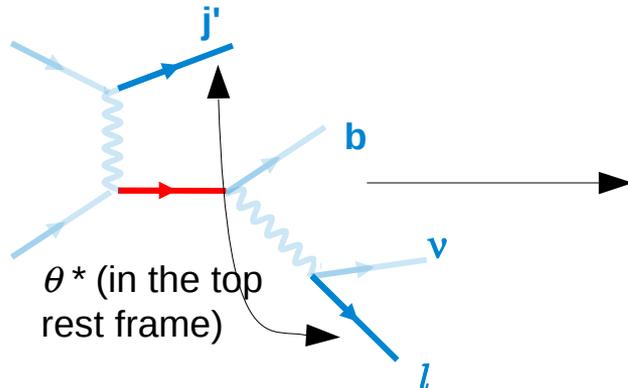


Polarizzazione del top nel single top: canale t

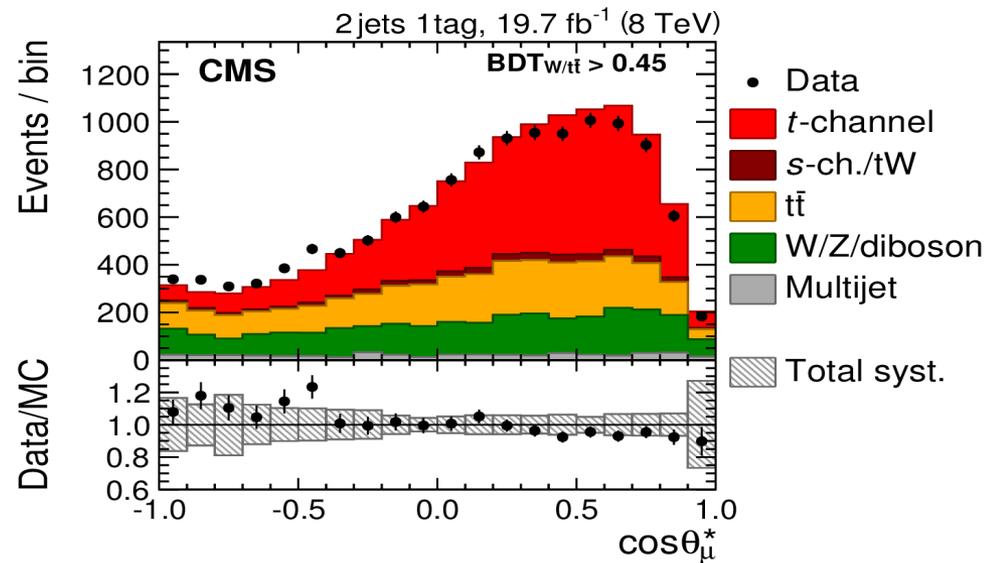
- Distribuzione dalla natura **V-A dell'accoppiamento:**

$$\frac{d\Gamma}{d \cos \theta_X} = \frac{\Gamma}{2} (1 + P_t \alpha_X \cos \theta_X) \equiv \Gamma \left(\frac{1}{2} + A_X \cos \theta_X \right)$$

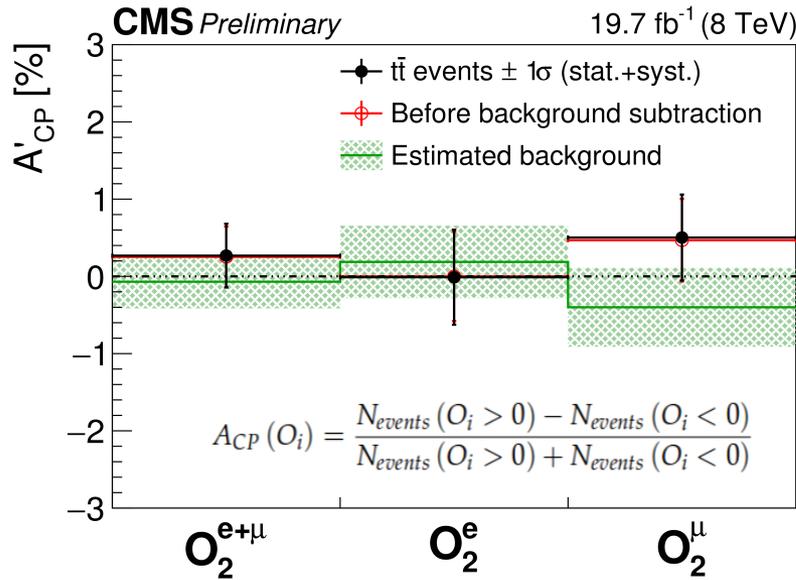
- θ_X = angolo tra il prodotto di decadimento e l'asse di spin del top
- A_X = asimmetria di spin, dipende dalla polarizzazione del top
- **Si misura:** θ^* in decadimenti leptonici:



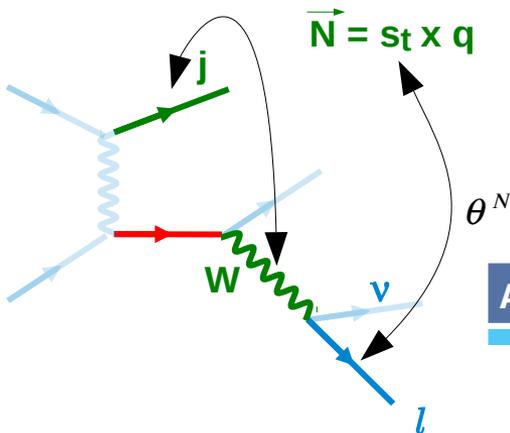
J.High Energy Phys.04(2016)073



Violazione di cp nella fisica del top:



- **Nel single-top:** misura della violazione CP in produzione

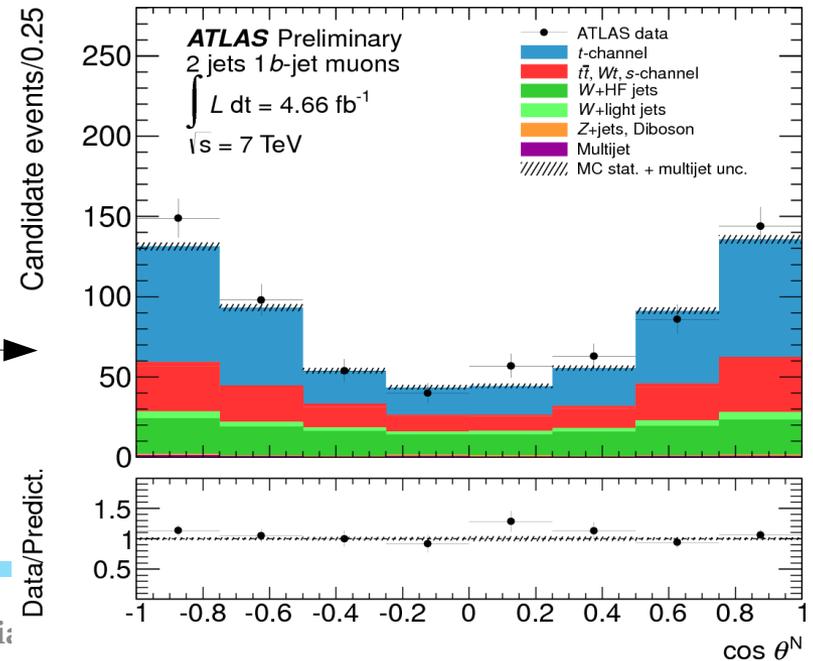


ATLAS CONF-2013-132

Alberto Orso Mari:

- **Violazione di CP nella produzione tt**
- Canali di decadimento con 1 leptone + jet
- Scelte **quattro osservabili** che presentano **asimmetria** in caso di violazione di CP
- Distribuzioni sondate in eventi ad 8 TeV

CMS TOP-16-001



Massa del quark top

Misure ad alta precisione

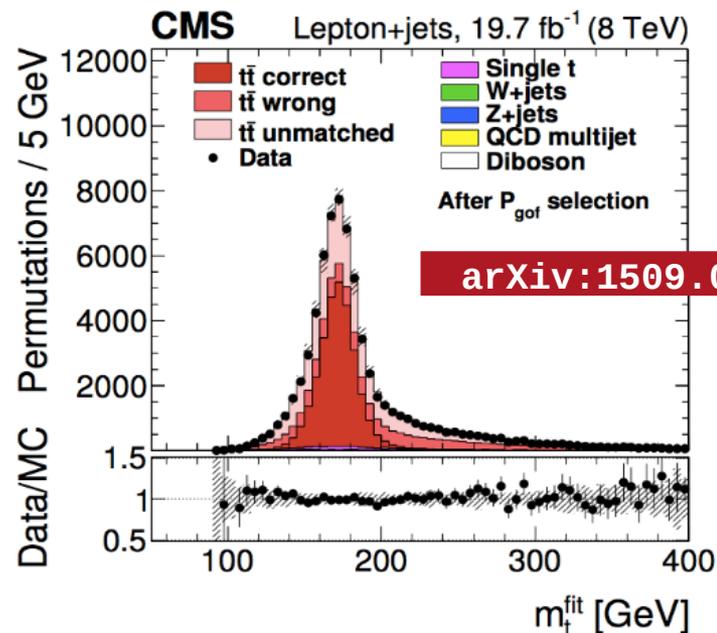
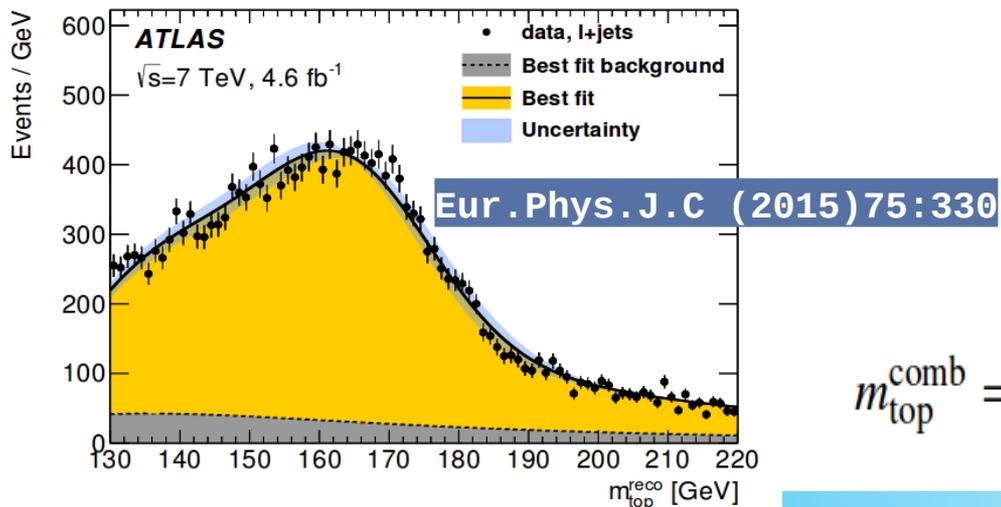
- **Canali ad 1 leptone +jet:**

- Si sceglie la migliore permutazione con un fit cinematico
- Si misura simultaneamente la massa e la scala di energia dei jet

- **Sistematiche principali:**

- correzioni all'energia dei jet da adroni B
- modellizzazione dei decadimenti di adroni B

$$m_t^{\text{hyb}} = 172.35 \pm 0.16 \text{ (stat+JSF)} \pm 0.48 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$



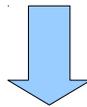
- **canali con 1-2 leptoni +jet:**

- Fit di maximum likelihood a **numeroso variabili sensibili alla massa**

$$m_{\text{top}}^{\text{comb}} = 172.99 \pm 0.48 \text{ (stat)} \pm 0.78 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

Misure con metodi alternativi

Misure più precise: sensibili alle incertezze sull'adronizzazione, sulla riconnessione di colore, etc...



Altre idee da entrambe gli esperimenti:

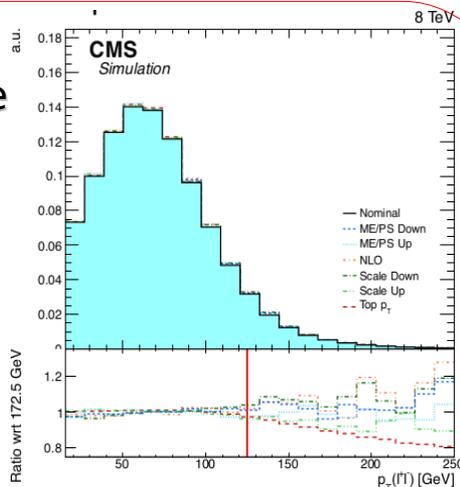
- Si possono usare **diverse osservabili...**

Osservabili del Leptone proveniente dal top

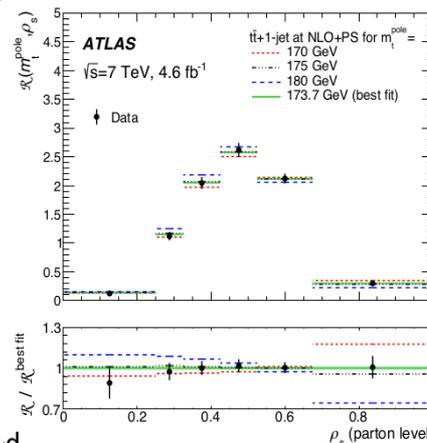
- meno sensibile a incertezze di adronizzazione

- suggerito in ArXiv:1407.2763

$m_t = 171.7 \pm 1.1$ (stat) ± 2.9 (syst+theo)



CMS TOP-16-002



d

$m_{top} = 173.7 + 2.3 - 2.1$ GeV

JHEP10(2015)121

Usare gli spettri $tt + 1$ jet

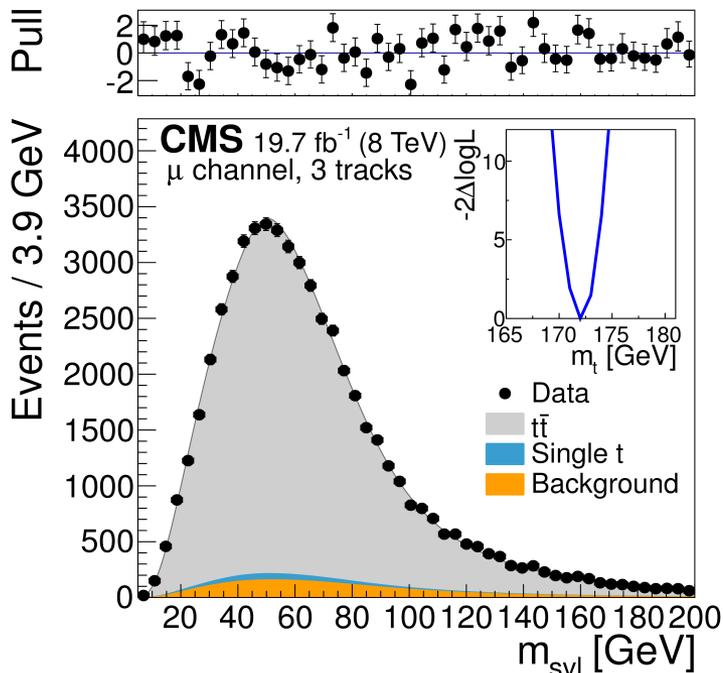
- Calcolata al NLO

- suggerito in ArXiv:1303.6415

Misure con metodi alternativi

... o anche diversi modi di decadimento o produzione!

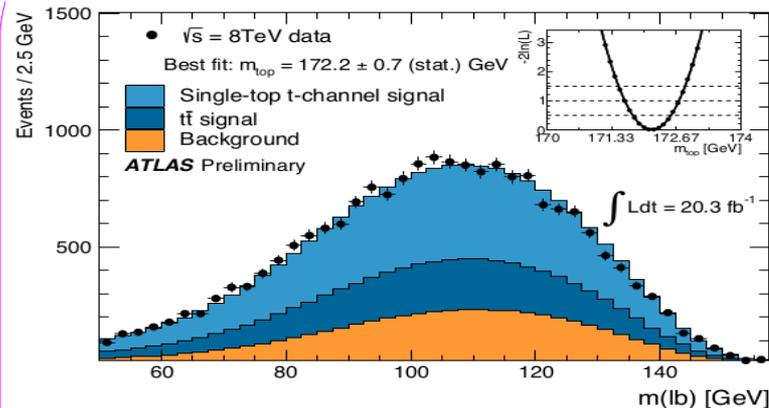
tt guardando le particelle cariche dei decadimenti adronici e il leptone proveniente dalla W



$$m_t = 173.68 \pm 0.20(\text{stat})^{+1.58}_{-0.97}(\text{syst}) \text{ GeV}$$

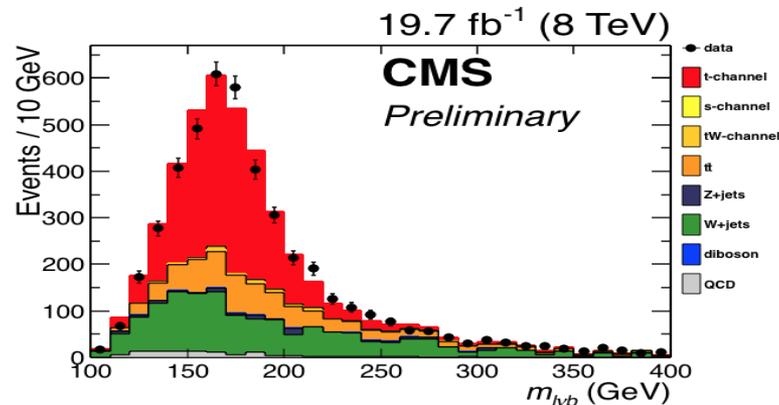
arXiv:1603.06536

Canali di top singolo:



$$m_{top} = 172.2 \pm 2.1 \text{ GeV}$$

ATLAS CONF-2014-055



$$m_{top} = 172.6 \pm 1.2 \text{ GeV}$$

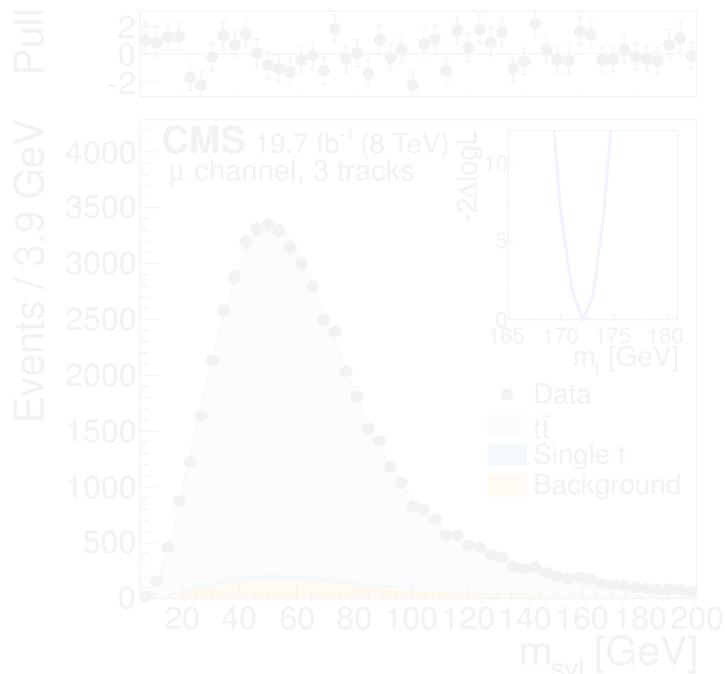
CMS TOP-15-001

Misure con metodi alternativi

... to different modes of decay or production!

... e molte altre disponibili!

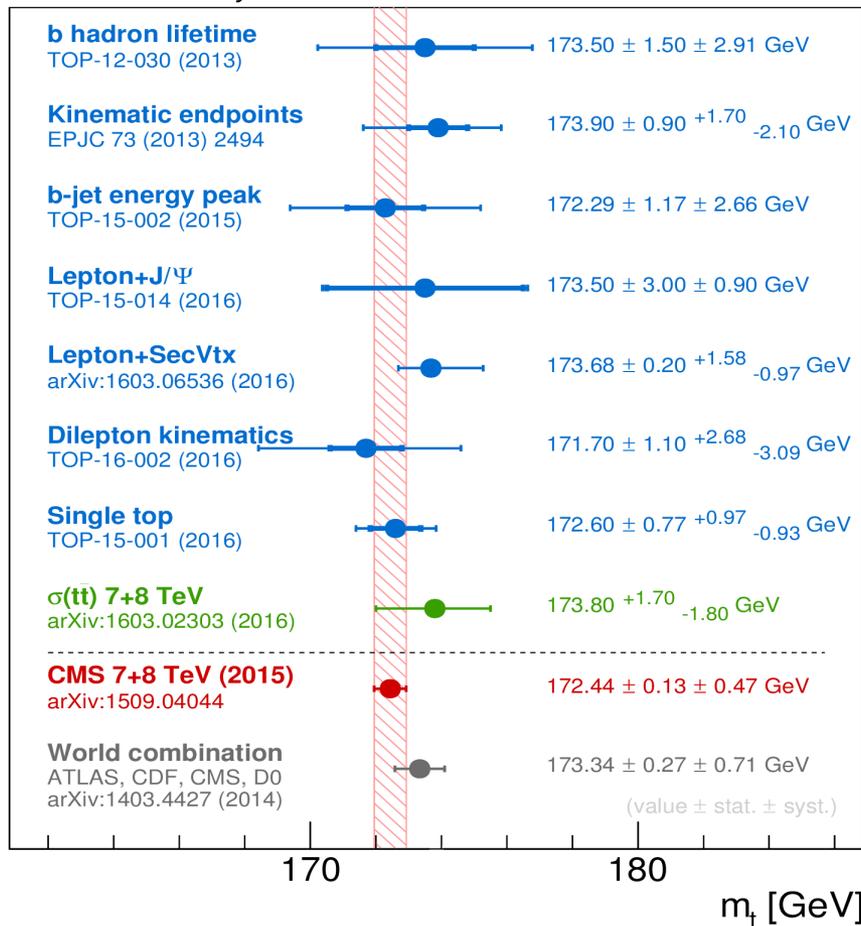
tt with charged particles from hadron decay and W lepton (see also: talk by Simon Spannagel)



$$m_t = 173.68 \pm 0.20(\text{stat})^{+1.58}_{-0.97}(\text{syst}) \text{ GeV}$$

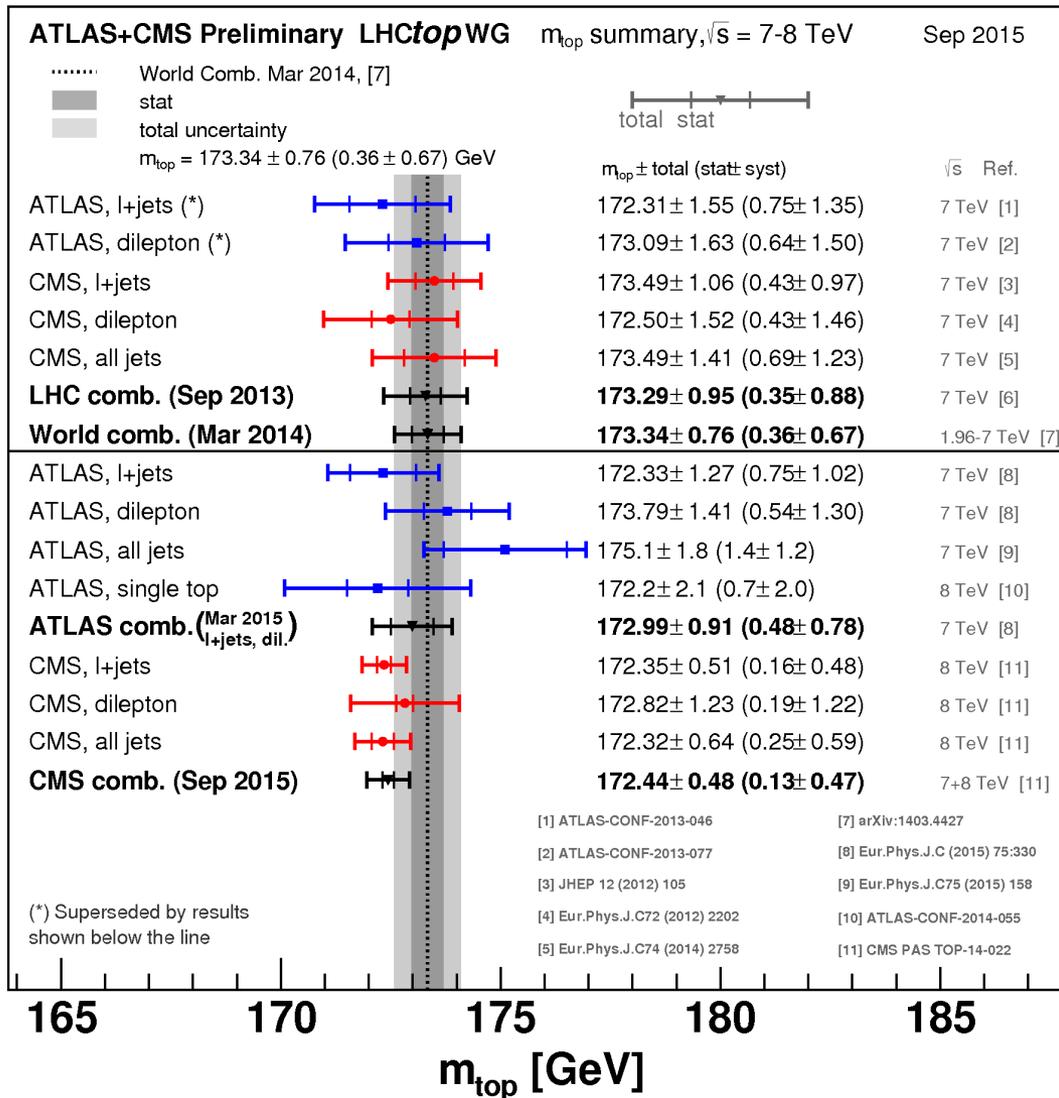
CMS Preliminary

March 2016



$$m_{top} = 172.6 \pm 1.2 \text{ GeV}$$

Panoramica delle misure di massa del top



Alla scalate del muro delle sistematiche!!!

Il primo nemico: le incertezze di modellizzazione per l'adronizzazione

Sforzo continuo per

- migliorare le tecniche in uso

- sviluppare nuovi metodi

- combinare le misure...**anche a diverse energie e in diversi Esperimenti!**

LHC Top WG summary plots

Conclusioni e prospettive

- **Produzione del quark top secondo il modello standard confermata anche a 13 TeV:**

Studiati sia i meccanismi di produzione **forte (tt)** che **elettrodebole (top singoli)**

Misure inclusive e differenziali

- **Fondamenta per una nuova era di fisica del quark top!**

Studi maturi basati sull'esperienza del Run I di LHC

Nuove misure possibili grazie ad energia e luminosità maggiori!

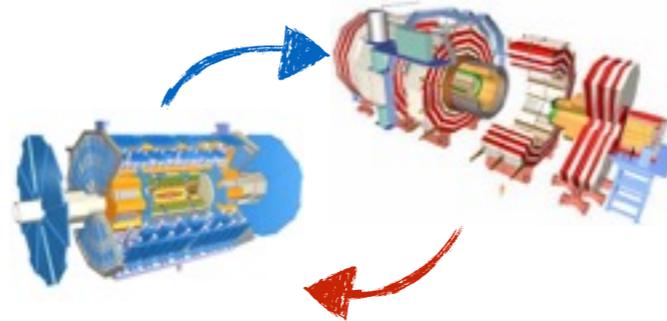
A presto misure coi nuovi dati del 2016!

Grazie!

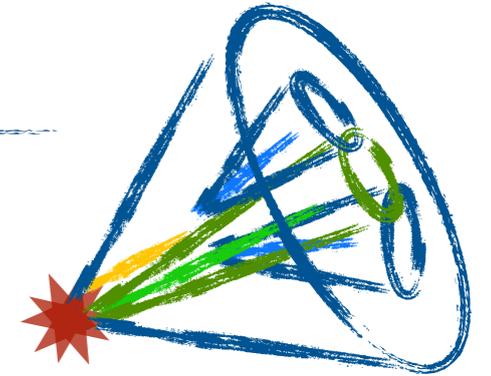
Discussione

Combinazione

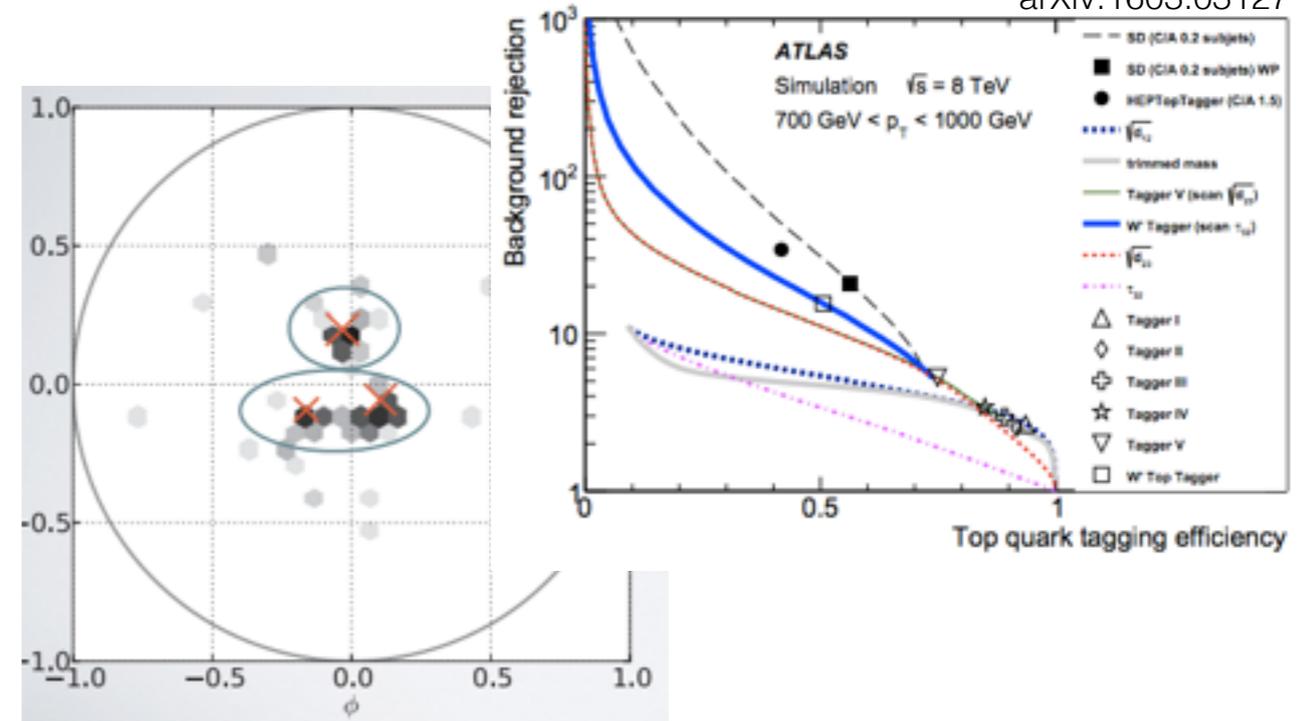
- TOP-LHC working group in charge!
- Simulazione di un esperimento con il setup dell'altro.
- Confronto prestazioni/correlazioni/sensibilità sugli effetti sistematici.
Quando meglio data-driven (occhio alla statistica MC!).
- Armonizzare la stima delle sistematiche (JES, MC-gen, ...).



Boosted



arXiv:1603.03127



LHCb



- Frazione di top da $q\bar{q}$ e qg ~doppia di ATLAS e CMS (zona forward). Introduce asimmetria.
- Segnali di nuova fisica presenti nella regione forward. (e.g arXiv: 1103.3747).
- LHCb può confermare misure di ATLAS e CMS. Importante per constraints su gluon PDF. (arXiv:1311.1810)
- Guadagno sensibile nel run2, apre le porte a misure importanti:
 - Run 1 (3fb): O(100) candidati
 - Run 2 (5fb): attesi O(1000) candidati.

- Future region of interest!
- Necessario affinare le tecniche e strategie di analisi.
- Molte tecniche disponibili ma poco sfruttate.
- Variabili di sottostruttura ma anche algoritmi più complicati (Shower Deconstruction, Template Overlap, ...).

Materiale extra

Canale tt

Altri canali tt 13 TeV: Analisi semileptoniche

◦ Cut and count :

- 1 e/ μ
- Atlas: $p_T > 25 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.47$
- CMS: $p_T > 30 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.1$
- almeno 4 jet ($p_T > 25 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.5$), 1 b-tag
- Atlas: tagli su ETmiss e massa trasversa bosone w

◦ Fondi principali:

- single-top, W+jets, QCD

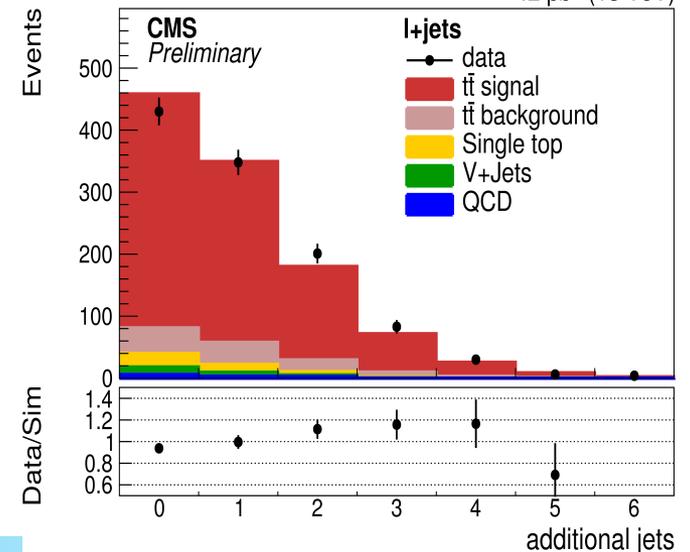
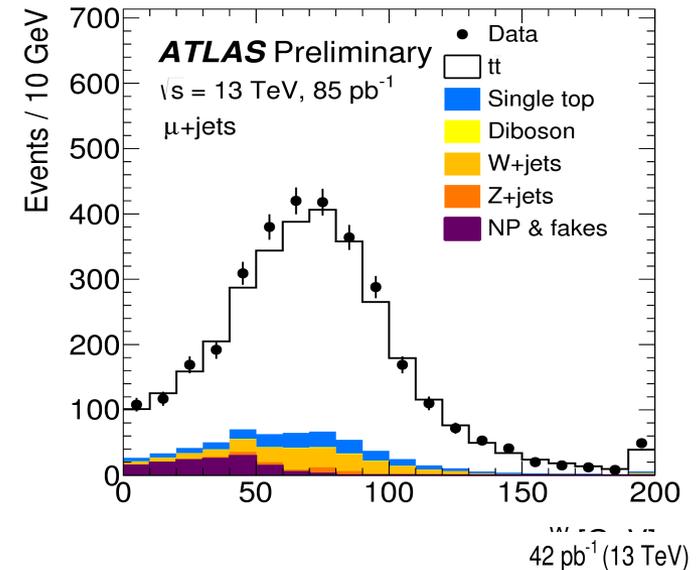
Già con $< 100 \text{ pb}$:

$$\sigma_{t\bar{t}} = 817 \pm 13 \text{ (stat)} \pm 103 \text{ (syst)} \pm 88 \text{ (lumi)} \text{ pb}$$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 836 \pm 27 \text{ (stat)} \pm 88 \text{ (sys)} \pm 100 \text{ (lumi)} \text{ pb}$$

Incertezze principali (sistematiche):

normalizzazione dei fondi



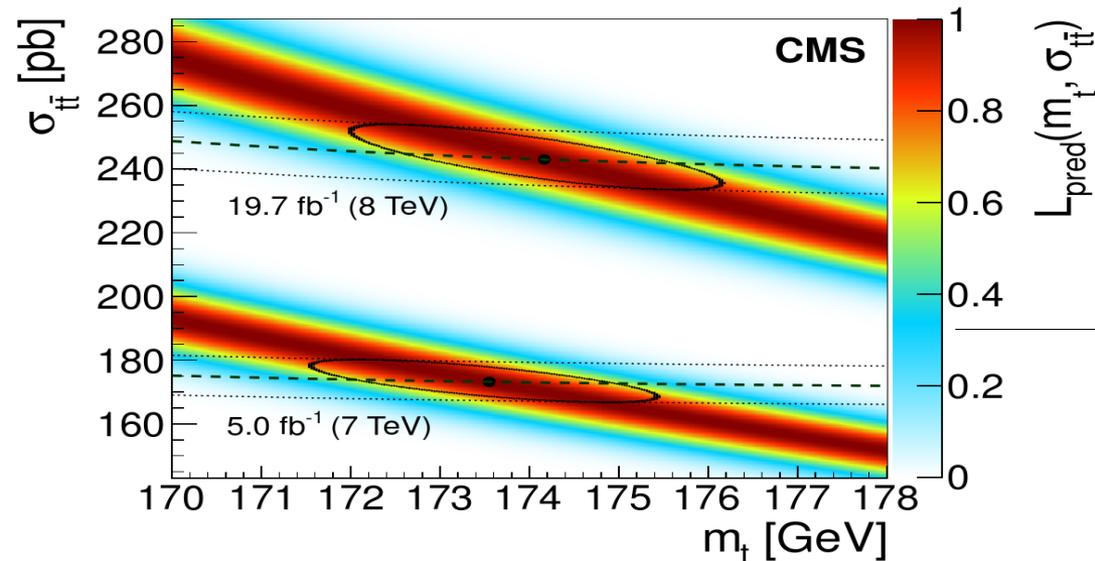
Measurements interpretation: top-quark pole mass

- Re-interpretation of cross section measurements:

- top mass used as parameter in the MC depends on the renormalisation scheme used

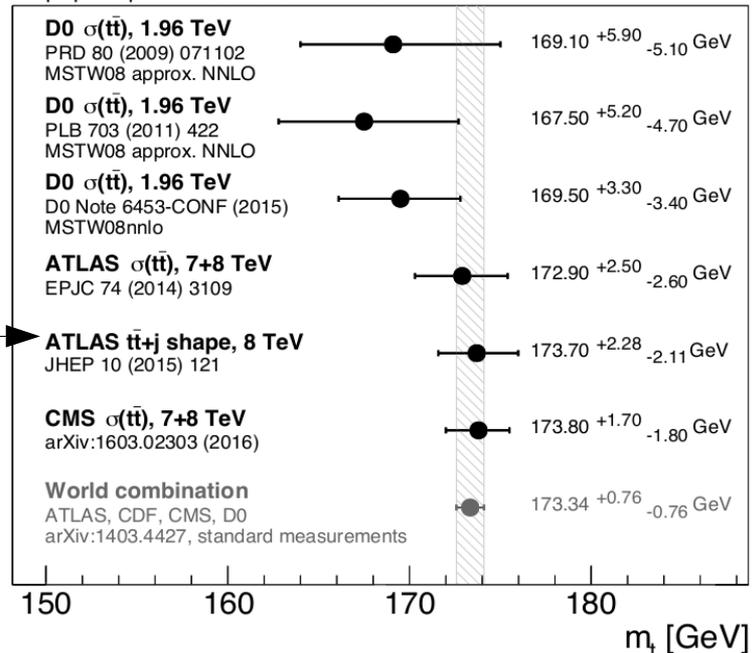
- top mass from the cross section parametrisation

- main uncertainties: from cross section measurement: luminosity, background yield, lepton reconstruction

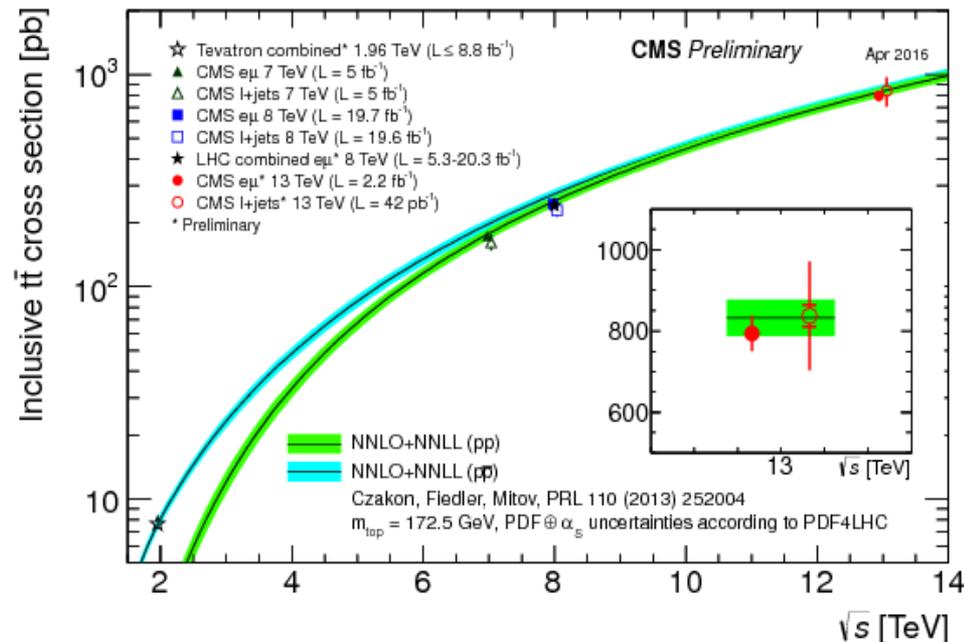
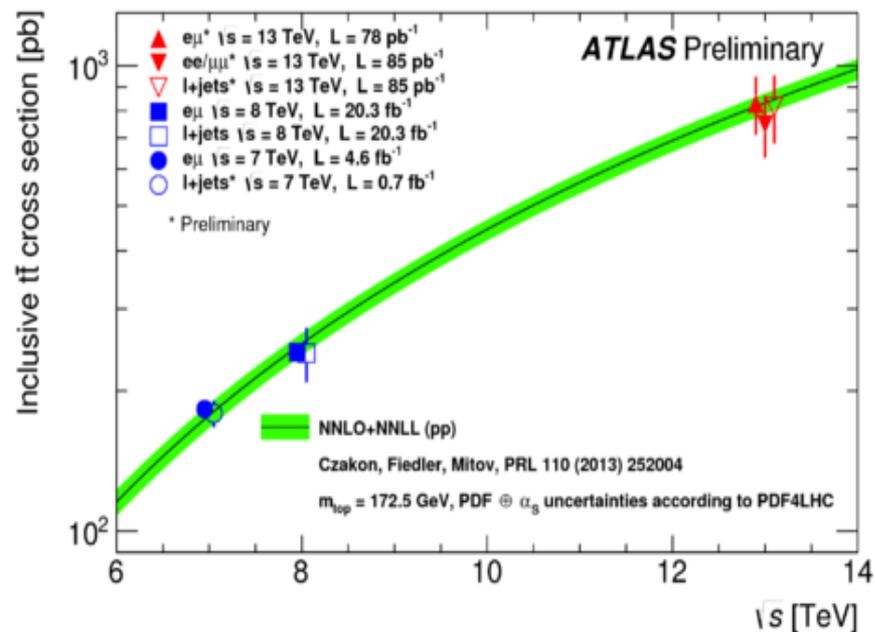


Top-quark pole mass measurements

March 2016



Prospettive future per tt?

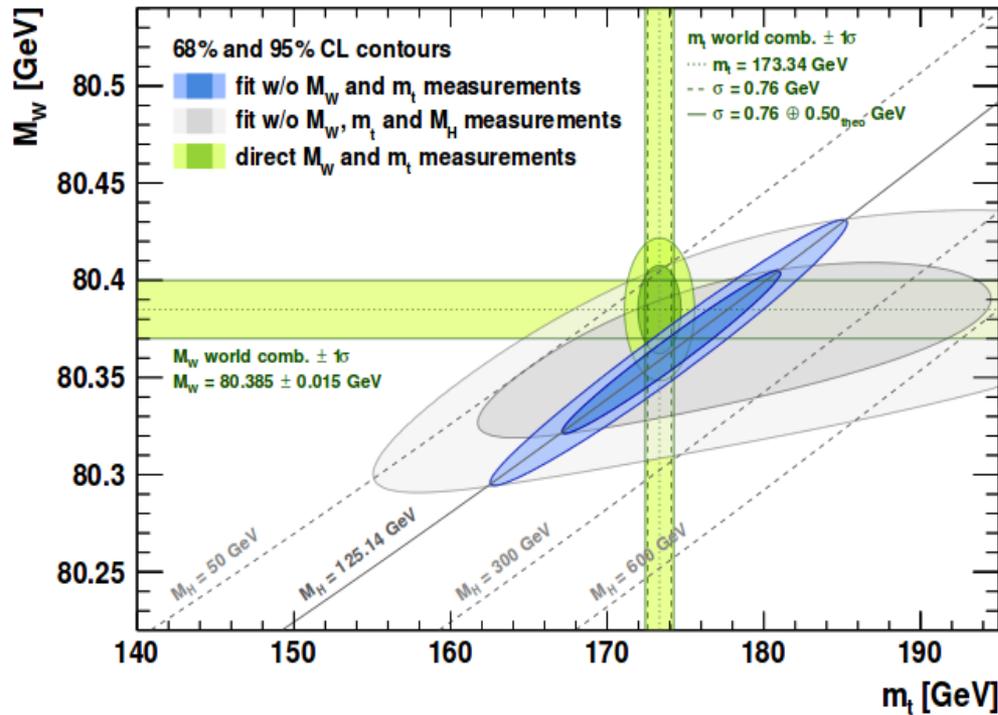


Misure a tutte le energie:

- Dominate dalle sistematiche anche a 13 TeV – verso il constrain delle sistematiche dai dati!
- Permette di misurare le gluon pdf ed α_s
- Misure della *pole mass* del quark top

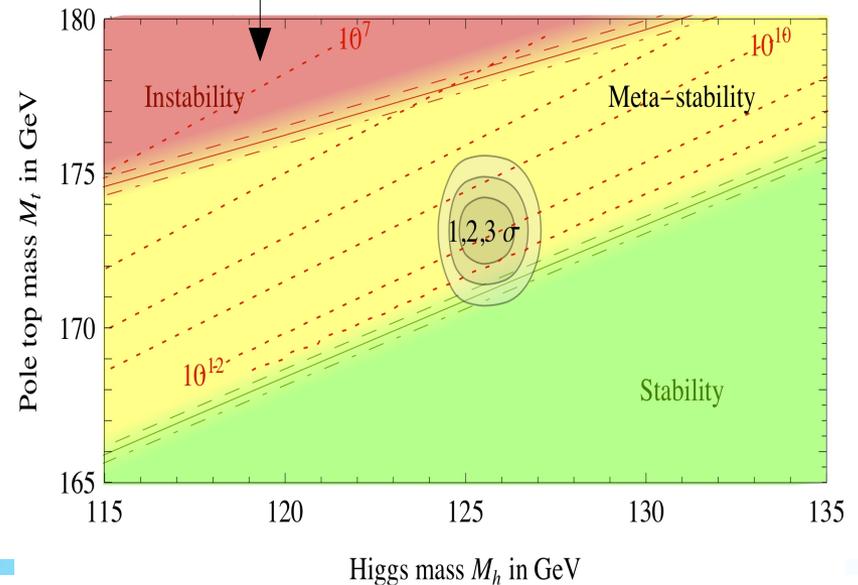
Massa del top

Top quark mass measurement



- **Test of consistency** for the standard model benefit from

- **Vacuum stability** and evolution depends on the exact value of the top quark mass



top + Vector Boson

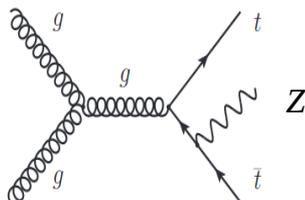
Coppie tt + bosone W/Z

ttZ: Permette di studiare correnti deboli **neutre**:
misurato a 8 TeV e **anche a 13 TeV!**

ATLAS CONF-2016-003

CMS TOP-16-009

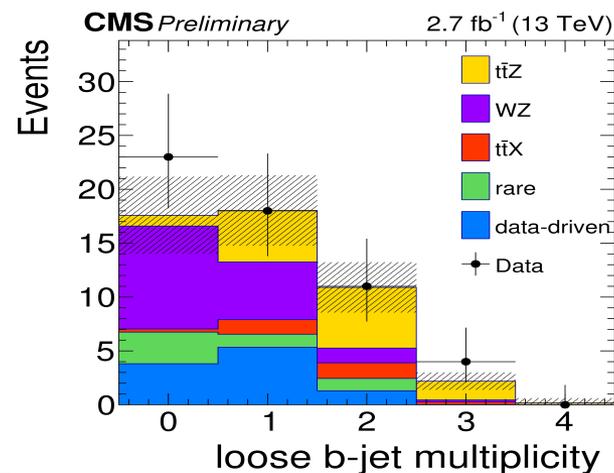
tt+Z



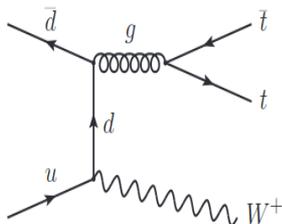
CMS ed Atlas:

selezione con 3-4 leptoni e ≥ 2 jet in diverse categorie

$$\sigma(tt Z) = 0.9 \pm 0.3 \text{ (Atlas)} / 1.1 \pm 0.4 \text{ (CMS)} \text{ pb}$$

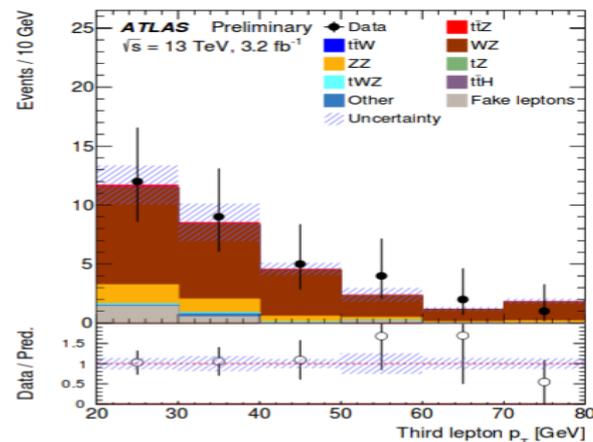


tt+W



Analisi di Atlas con 2-3 leptoni e ≥ 2 jet,

$$\sigma(tt W) = 1.4 \pm 0.8 \text{ pb}$$



Coppie tt + fotone

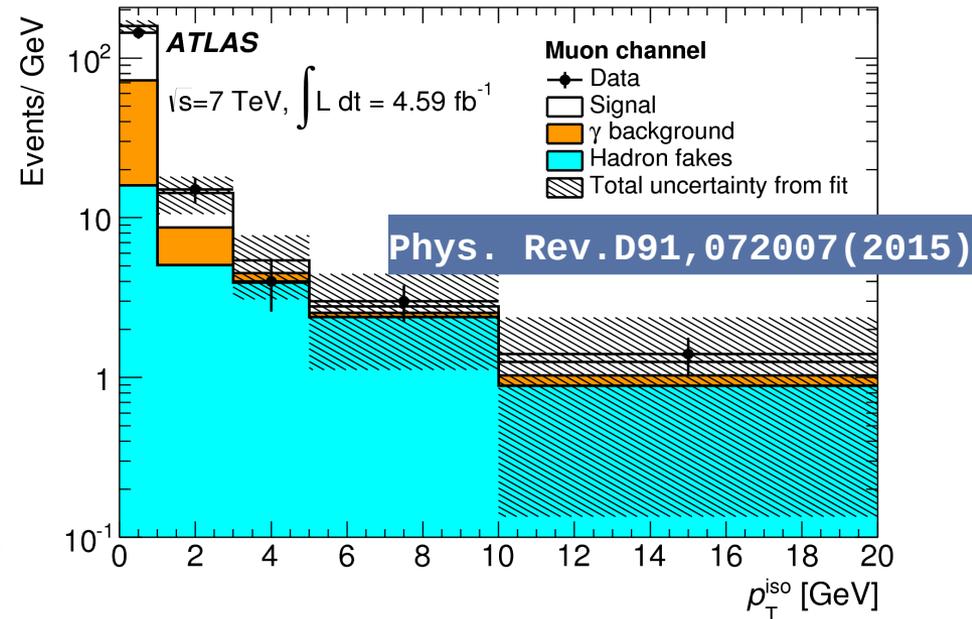
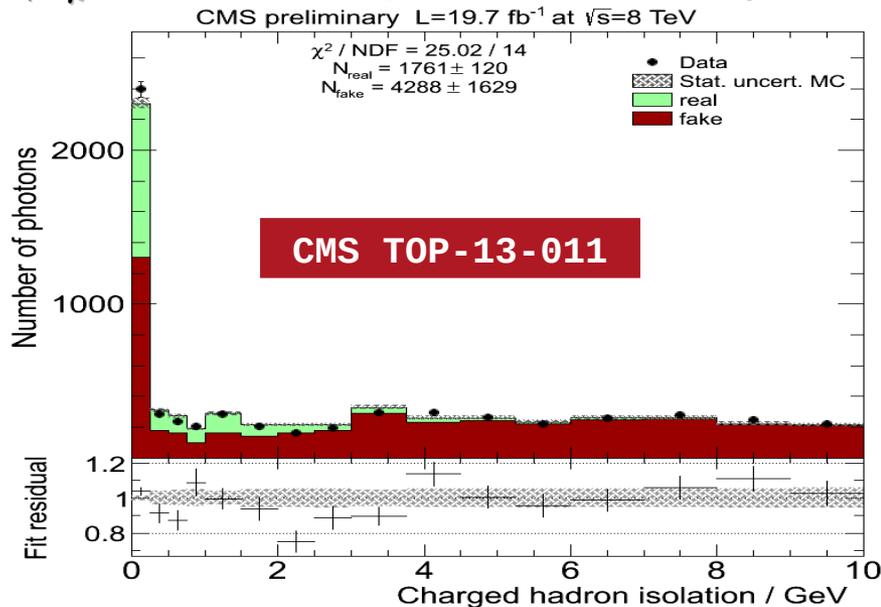
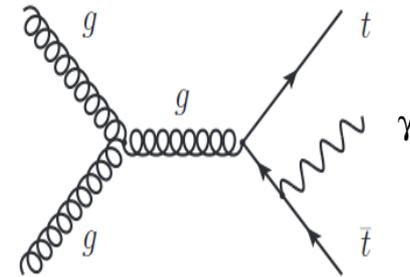
Completa il quadro delle correnti neutre elettrodeboli

Sonda la **carica elettrica** del quark top

Misure a 7 (**Atlas**) ed 8 (**CMS**) TeV nel Run I:

$\sigma(tt\gamma) = 68 \pm 17 \text{ fb}$ at 7 TeV (48 fb attesa, in una regione fiduciale)

$\sigma(tt\gamma) = 2.4 \pm 0.6 \text{ pb}$ at 8 TeV (1.8 pb attesa)

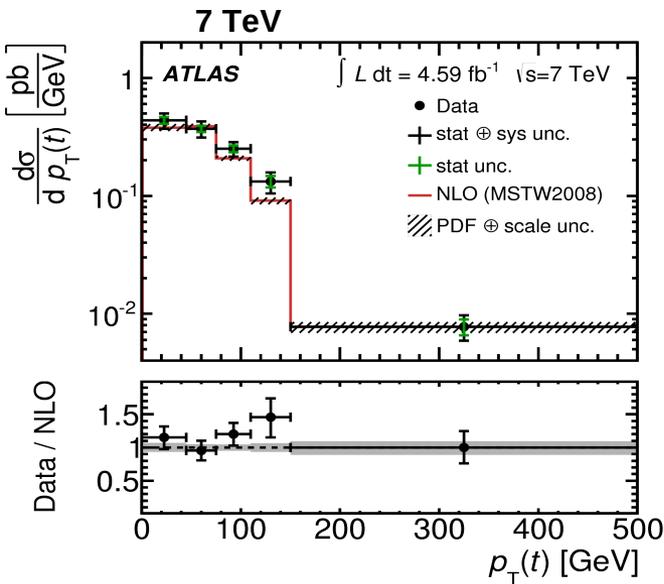


Top singolo

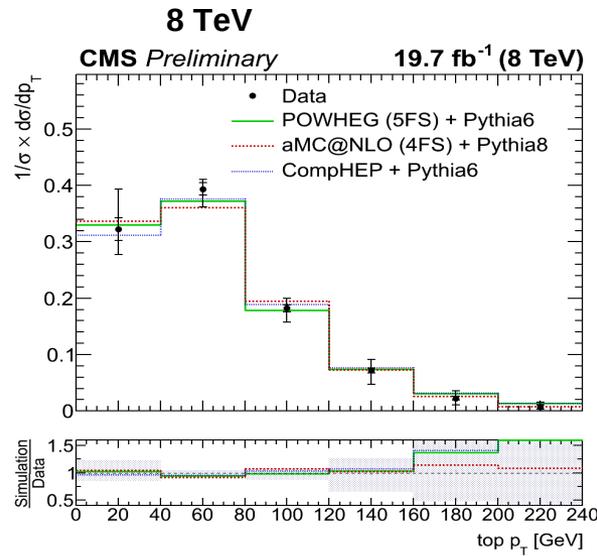
t -channel single-top: cross sections and $|V_{tb}|$

Source	$\Delta\sigma_{tq}/\sigma_{tq}$ [%]	$\Delta\sigma_{\bar{t}q}/\sigma_{\bar{t}q}$ [%]		$\Delta\sigma_{t-\text{ch},t+\bar{i}}/\sigma_{t-\text{ch},t+\bar{i}}^{\text{obs}}$	$\Delta\sigma_{t-\text{ch},t}/\sigma_{t-\text{ch},t}^{\text{obs}}$	$\Delta\sigma_{t-\text{ch},\bar{i}}/\sigma_{t-\text{ch},\bar{i}}^{\text{obs}}$
Data statistics	± 4.6	± 5.0	S	uncertainty source		
MC statistics	± 6.3	± 6.5		uncertainty of the fit (stat. + prof. unc.)	$\pm 6.8\%$	$\pm 7.4\%$
Multijet normalisation	± 0.8	± 2.4	/	statistical uncertainty	$\pm 4.0\%$	$\pm 4.7\%$
Other background normalisation	± 1.4	± 0.5		profiled uncertainties	$\pm 5.5\%$	$\pm 5.7\%$
Muon uncertainties	± 1.6	± 1.6	/	MC statistics	$\pm 2.8\%$	$\pm 3.4\%$
JES	± 5.5	± 1.6		pileup	$-0.2/+0.1\%$	$-0.5/+0.4\%$
Jet energy resolution	± 4.3	± 3.1	/	experimental uncertainty	$-6.2/+6.2\%$	$-6.7/+6.7\%$
E_T^{miss} modelling	± 4.2	± 4.5		Signal modeling	$\pm 7.9\%$	$\pm 10.1\%$
b -tagging efficiency	± 7.1	± 7.5	/	$t\bar{t}$ modeling	$\pm 4.3\%$	$\pm 3.9\%$
c -tagging efficiency	< 0.5	< 0.5		W+jets modeling	$-2.1/+1.7\%$	$-1.6/+1.1\%$
Light-jet tagging efficiency	< 0.5	< 0.5	/	Q^2 scale t -channel	$-5.7/+7.0\%$	$-7.1/+5.1\%$
Pile-up reweighting	± 1.2	± 3.2		Q^2 scale $t\bar{t}$	$-2.7/+4.1\%$	$-2.5/+4.0\%$
W+jets modelling	± 2.3	± 1.0	/	Q^2 scale tW	$-0.3/+0.5\%$	$-0.4/+0.3\%$
$t\bar{t}, Wt$ and s -channel shower generator	< 0.5	± 2.3		Q^2 scale W+jets	$-2.7/+3.0\%$	$-2.5/+4.2\%$
$t\bar{t}, Wt$ and s -channel NLO matching	± 2.7	± 7.0	/	PDF uncertainty	$-3.0/+2.6\%$	$-3.1/+3.2\%$
$t\bar{t}, Wt$ and s -channel scale	± 2.6	± 0.9		top p_T modeling	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
t -channel scale	± 5.9	± 7.7	/	total theory uncertainties	$-12.1/+12.6$	$-13.8/+13.6$
t -channel generator	± 11.0	± 15.0		luminosity	$\pm 2.7\%$	$\pm 2.7\%$
PDF	< 0.5	± 1.0	/	total uncertainty	$-14.5/+14.8\%$	$-16.3/+16.1\%$
Luminosity	± 5.0	± 5.0				
Total systematic uncertainty	± 18.4	± 24.4				
Total uncertainty	± 19.0	± 25.0				

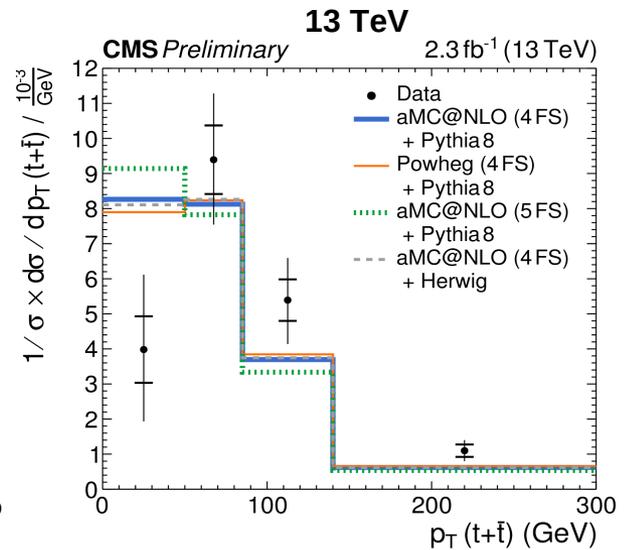
top singolo nel canale t : misure differenziali



Phys. Rev. D. 90, 112006 (2014)



CMS TOP-14-004



CMS TOP-16-004

- **Misure delle proprietà del top singolo: momento, rapidità**

- Stessa selezione che per la misura di sezione d'urto, unfolded alle distribuzioni di generatore

- ad alta precisione: utile per discriminare tra i modelli per il segnale!

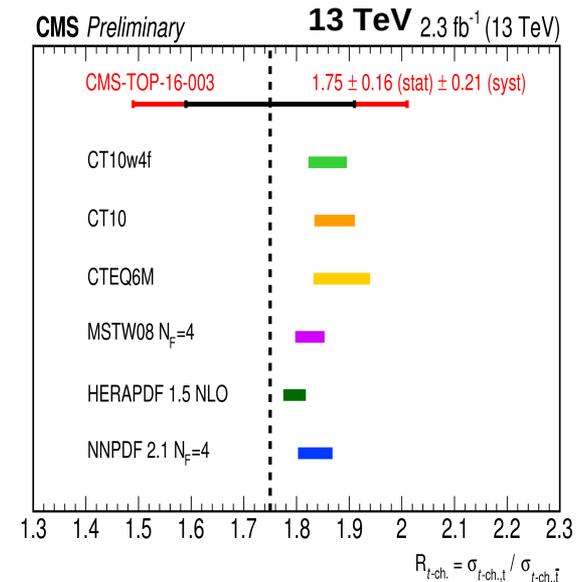
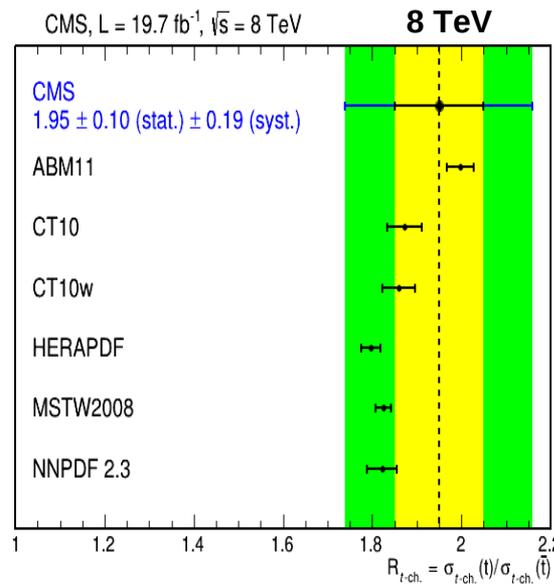
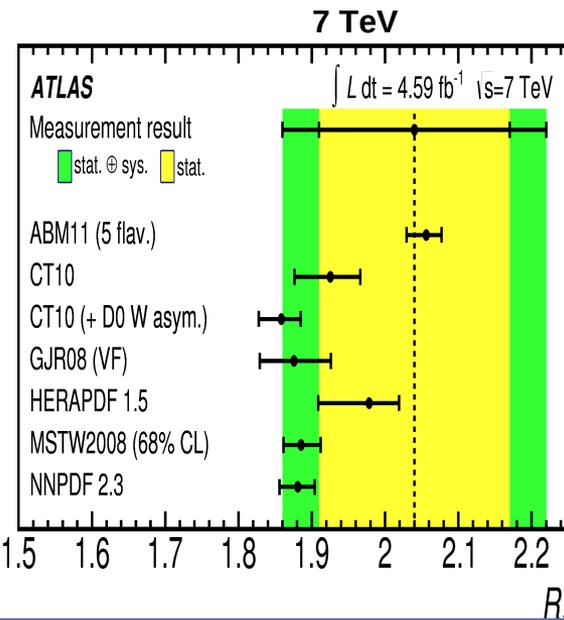
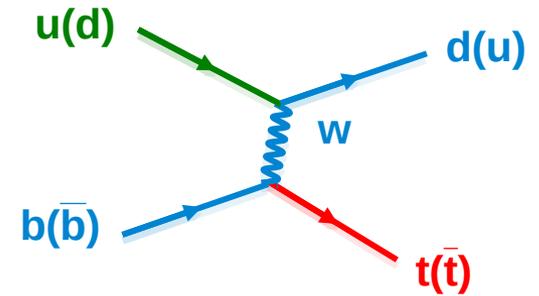
top singolo nel canale t : asimmetria di carica

- **Asimmetria nella produzione dei top quark:**

- proviene dalla composizione in termini di quark di valenza:

$$\sigma(\text{top})/\sigma(\text{antitop}) \sim 2$$

- si può studiare a partire dal segno del leptone



Phys. Rev. D. 90, 112006 (2014)

JHEP 06 (2014) 090

CMS TOP-16-003

Asimmetria cp

Asimmetria CP in eventi tt

- **Violazione di CP nella produzione tt**

- Canali di decadimento con 1 leptone + jet

- Scelte **quattro osservabili** che presentano **asimmetria** in caso di violazione di CP

- Distribuzioni sondate in eventi ad 8 TeV

$$O_2 = \epsilon(P, p_b + p_{\bar{b}}, p_\ell, p_{j1}) \xrightarrow{lab} \propto (\vec{p}_b + \vec{p}_{\bar{b}}) \cdot (\vec{p}_\ell \times \vec{p}_{j1})$$

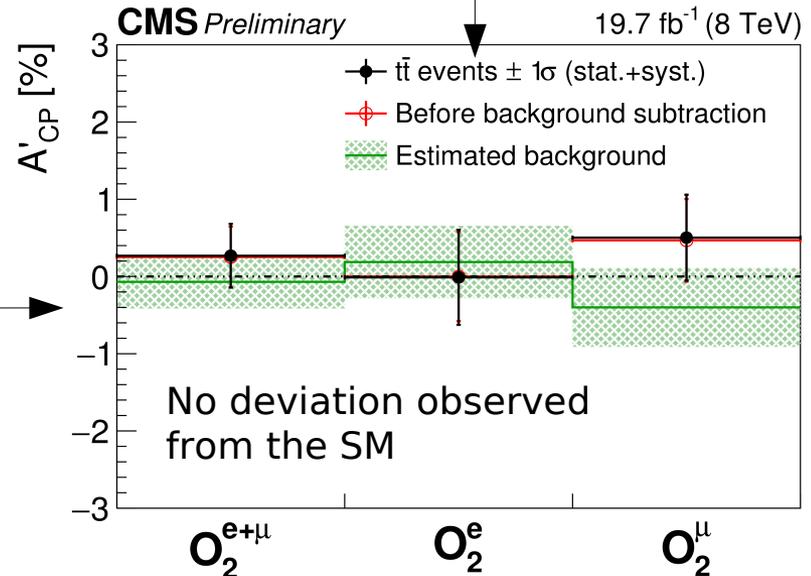
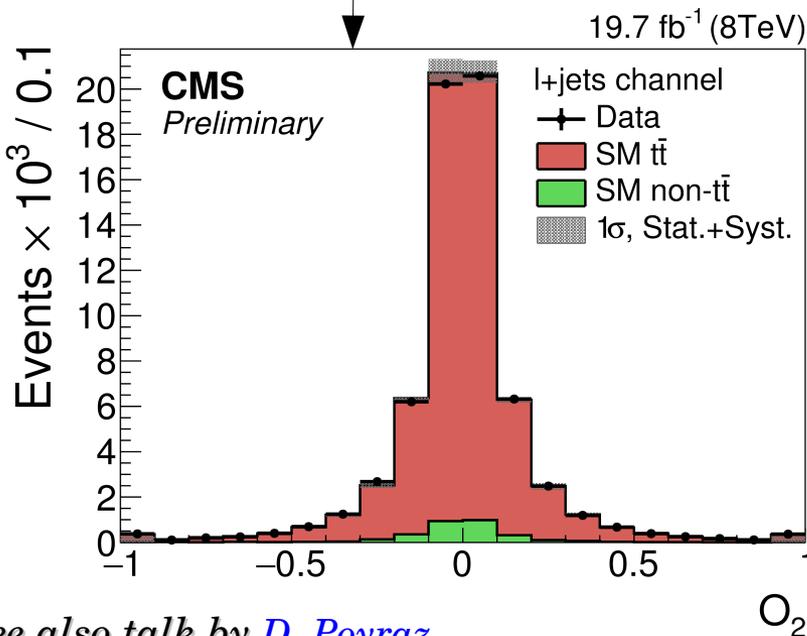
$$O_3 = Q_\ell \epsilon(p_b, p_{\bar{b}}, p_\ell, p_{j1}) \xrightarrow{b\bar{b} \text{ CM}} \propto Q_\ell \vec{p}_b \cdot (\vec{p}_\ell \times \vec{p}_{j1})$$

$$O_4 = Q_\ell \epsilon(P, p_b - p_{\bar{b}}, p_\ell, p_{j1}) \xrightarrow{lab} \propto Q_\ell (\vec{p}_b - \vec{p}_{\bar{b}}) \cdot (\vec{p}_\ell \times \vec{p}_{j1})$$

$$O_7 = q \cdot (p_b - p_{\bar{b}}) \epsilon(P, q, p_b, p_{\bar{b}}) \xrightarrow{lab} \propto (\vec{p}_b - \vec{p}_{\bar{b}})_z (\vec{p}_b \times \vec{p}_{\bar{b}})_z$$



$$A_{CP}(O_i) = \frac{N_{events}(O_i > 0) - N_{events}(O_i < 0)}{N_{events}(O_i > 0) + N_{events}(O_i < 0)}$$



See also talk by [D. Poyraz](#)

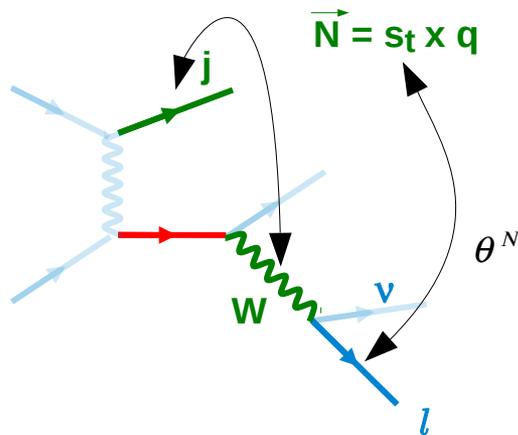
CP violation in single-top t -channel events

◦ Dall'asse di polarizzazione s_t , preso dal jet di rinculo j jet j , si definisce:

$$A_{FB}^N = \frac{N(\cos \theta^N > 0) - N(\cos \theta^N < 0)}{N(\cos \theta^N > 0) + N(\cos \theta^N < 0)} = 0.64 P \mathfrak{I}(gr)$$

dove l'ultima parte è una componente della lagrangiana CP violating

- **Osservabile:** θ^N in decadimenti leptonici:

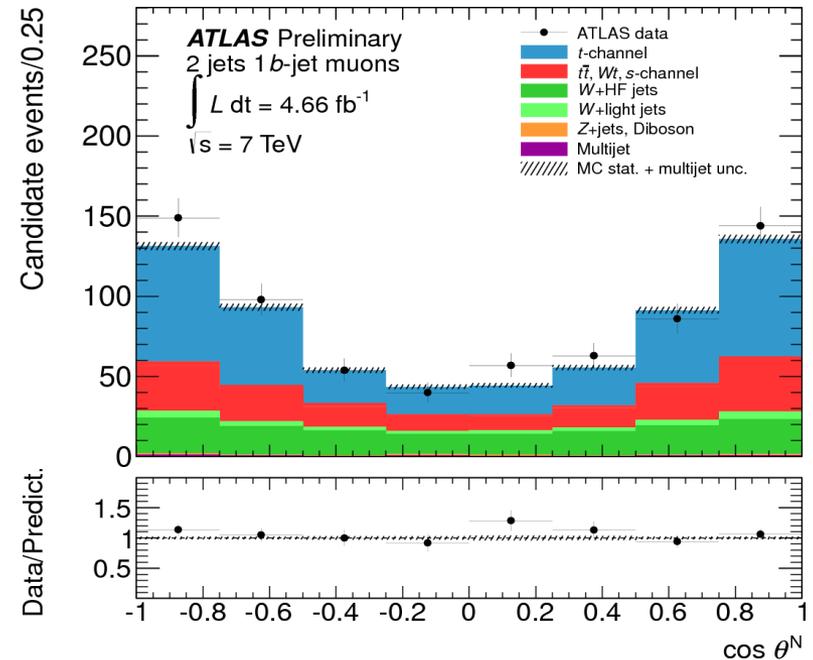


◦ Limite al 95% CL su

$$\mathfrak{I}(gr) \in [-0.20, 0.30]$$

$\mathfrak{I}(gr)$

ATLAS CONF-2013-132



Fisica BSM

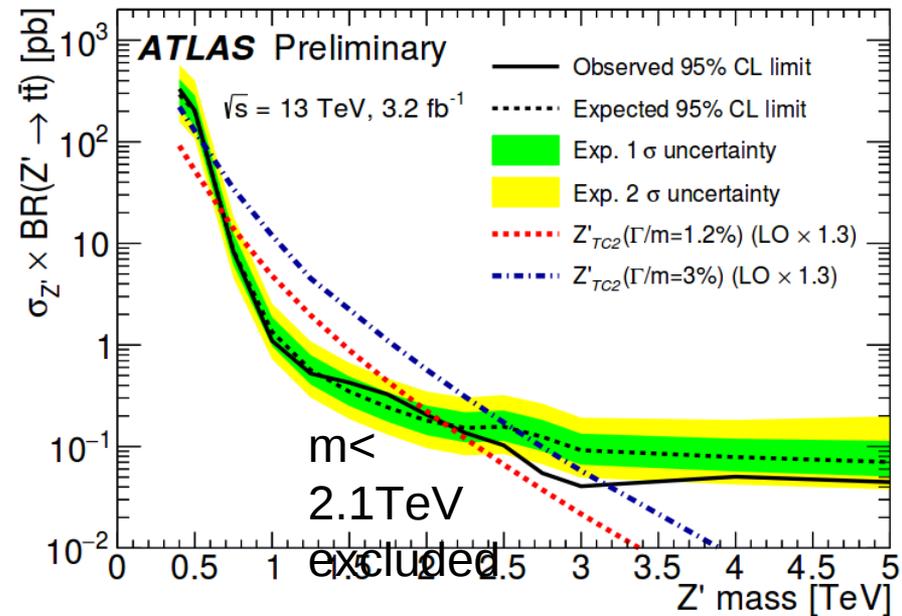
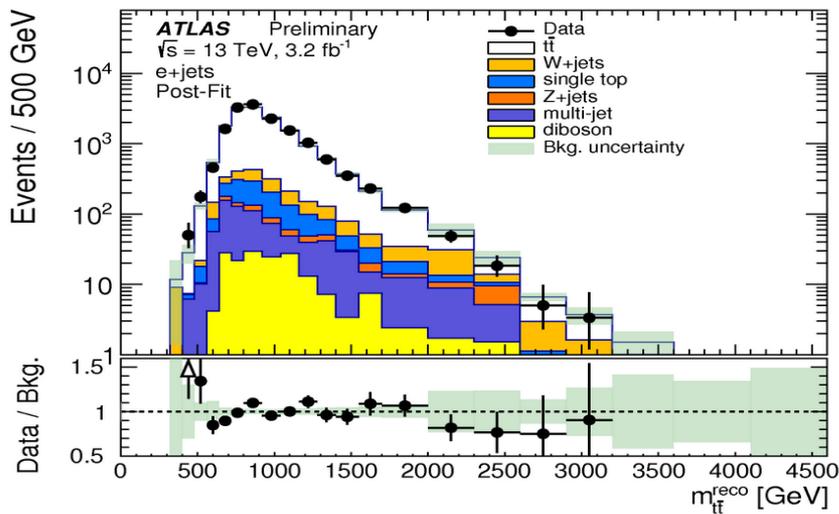
Nuove particelle associate a top

- Estensioni BSM prevedono nuove particelle accoppiate a top:
 - bosoni di gauge pesanti (W,Z,DY...)
 - Nuovi fermioni: top o bottom “partners”
 - Produzione multitop

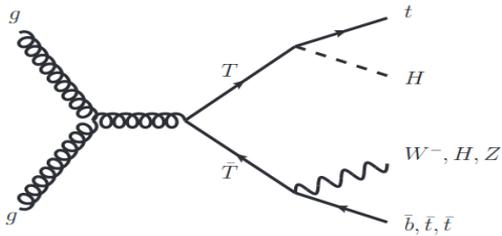
- Ricerche di risonanze tt:

- selezione 1 leptone + jet
- top adronico boosted

ATLAS CONF-2016-014

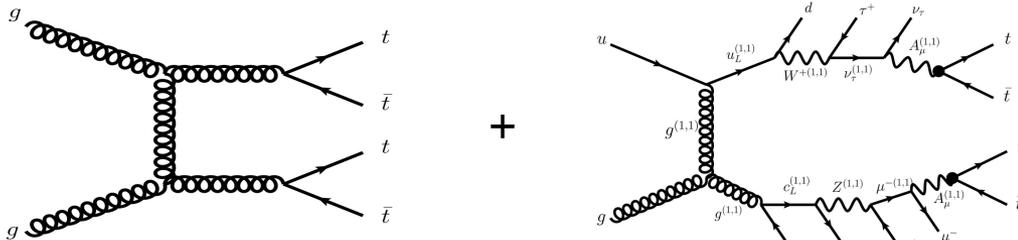


VLQ e multitop



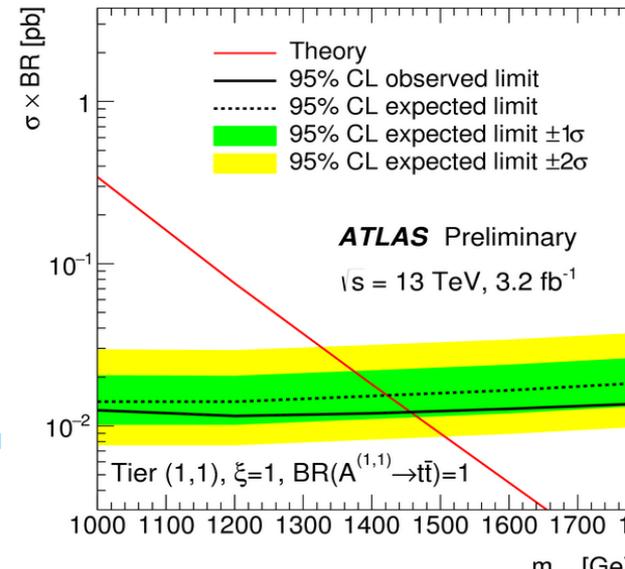
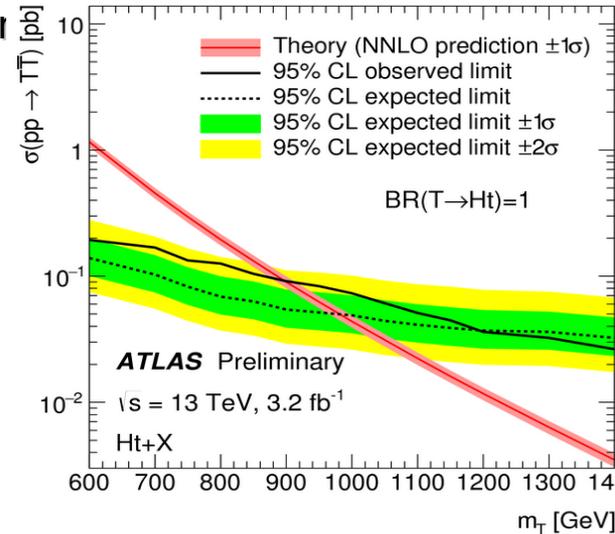
- 1 leptone isolato Estensioni BSM per
 - alta energia trasversa
 - alta molteplicità di jet
 - 1 top decade in tH:
 - boosted top e higgs tagging
- $m < 900$ GeV è esclusa

Stessa segnatura della produzione 4 top:



I+ jets

ATLAS CONF-2016-013

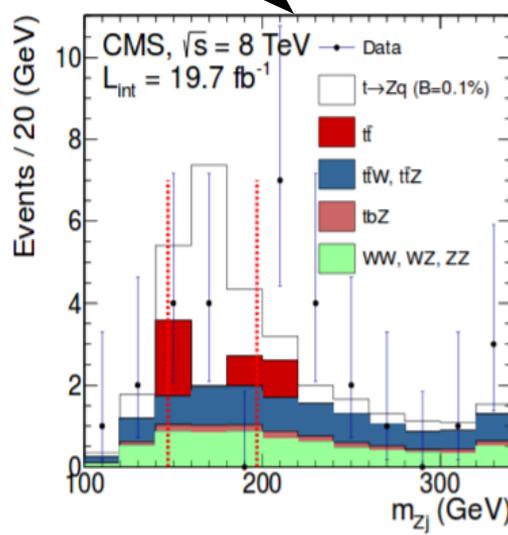
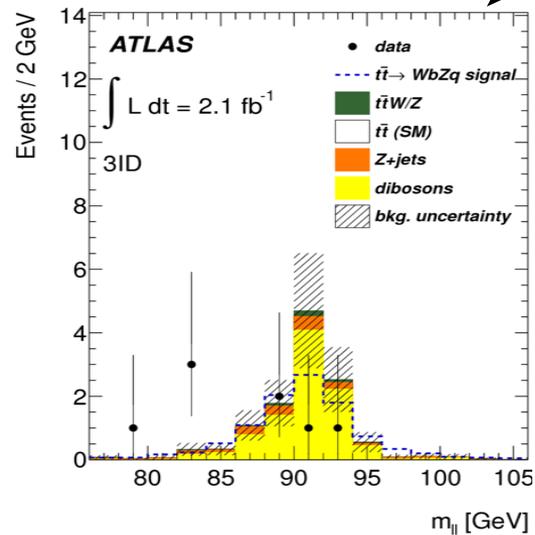
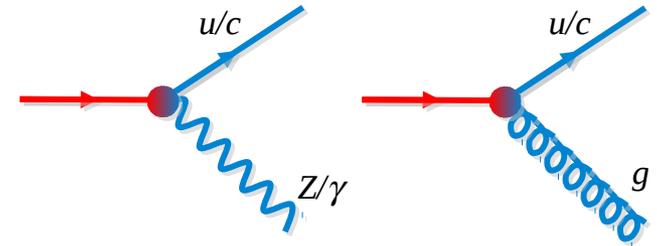


FCNC nei decadimenti tt

- **top decays:**

- FCNC possono dare $t \rightarrow u/c + g/z/\gamma$: eventi con 2 top

- CMS ed Atlas cercano eventi con 3 leptons, 2 dei quali vanno in una risonanza Z



$BR(t \rightarrow Zq) < \mathbf{0.73\% (Atlas)} /$
 $< \mathbf{0.05\% (CMS)}$

PLB 716 (2012) 142-159

PRL 112 (2014) 171802

FCNC nel top singolo

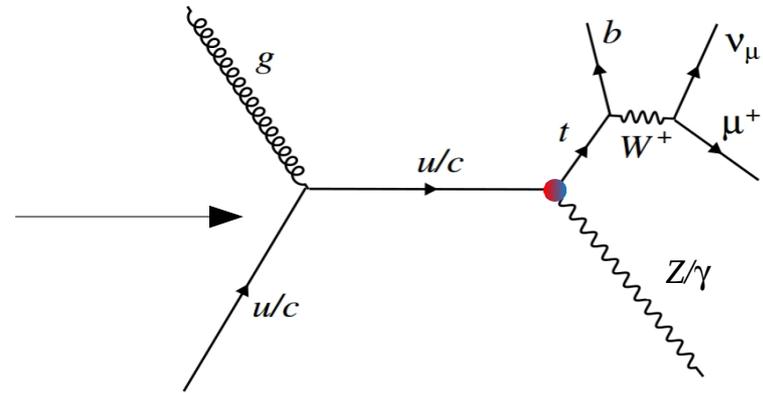
- **single-top + Z/gamma:**

- Bassa sezione d'urto nello standard model (~ 0.2 pb @8 TeV).

- Può aumentare significativamente per BSM FCNC

- a 13 TeV ancora maggiore sensibilità!

- eventi con 3 leptoni / 1 leptone e 1 fotone



CMS PAS-TOP-12-021

arXiv:1511.03951

