

# Etude de la fragmentation des quarks $b$ avec des mésons charmés dans des événements $t\bar{t}$ avec le détecteur ATLAS

Jad Zahreddine

Stage fait au Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies (LPNHE), Paris  
du 20 Mars 2017 au 13 Juillet 2017

sous la direction de:  
Tristan Beau et Frédéric Derue

Soutenance M2 NPAC, 26 Juin 2017

# Le Modèle Standard de la physique des particules

## Le Modèle Standard

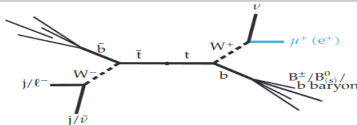
Né dans les années 70, il décrit de manière cohérente :

- toutes les particules élémentaires : quarks et leptons
- 3 interactions : électromagnétique, faible et forte
- Boson de Higgs découvert en 2012

	masse → charge → spin →	↑	↑	↑	↑	↑
QUARKS	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
LEPTONS	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
						BOSONS DE JAUGE

## Le quark top

- La particule élémentaire la plus massive → fort couplage au boson de Higgs
- Temps de vie très court ( $\tau \sim 5 \times 10^{-25}$  s) → se désintègre avant l'hadronisation ( $\sim 2 \times 10^{-24}$  s) : possibilité d'étudier ce quark nu
- 2 modes de production : en paires  $t\bar{t}$  ( $\sim 75\%$ ), en top célibataire ( $\sim 25\%$ )
- $t \rightarrow Wb$  à  $\sim 100\%$ , canaux de désintégration : hadronique (46%), lepton + jets (44%), dilepton (10%)

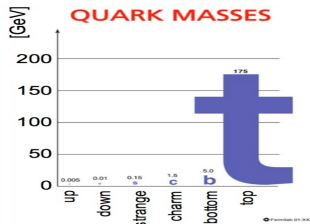


# La mesure de la masse du quark top

La masse du quark top est un paramètre fondamental du modèle standard

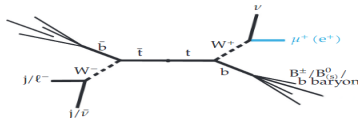
## Motivations

- Ajustement électrofaible
- Lié à l'instabilité du vide



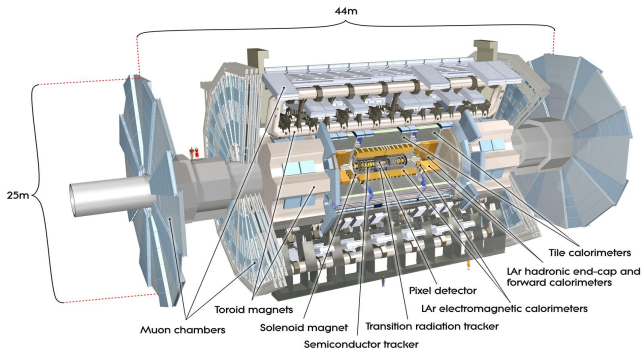
## Mesures expérimentales

- $m_t = 173.34 \pm 0.36$  (stat.)  $\pm 0.67$  (syst.) GeV (World Comb. 2014)
- Mesure indirecte via :  $m_{lb} = \frac{m_t^2 - m_W^2}{2} (1 - \cos\theta_{lb})$
- $\sigma$ (syst.) limitée par notre connaissance de l'échelle d'énergie des jets (JES)
- Solution : Utilisation de mésons charmés avec des leptons et/ou de traces dans l'état final  $\rightarrow$  pas de sensibilité à la JES, mais la sensibilité à la modélisation de la désintégration du quark b



# ATLAS au LHC

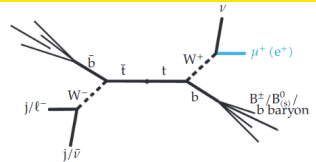
Le LARGE HADRON COLLIDER (LHC) est un collisionneur de particules avec une énergie dans le centre de masse de  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Ces collisions se produisent toutes les 25 ns.



## A TOROIDAL LHC APPARATUS (ATLAS)

- Regroupe 5000 personnes venant de 180 instituts dont 7 français de 38 pays
- Détecteur à symétrie cylindrique de 44 m de longueur et 25 m de diamètre, est formé : d'un trajectographe interne, de calorimètres électromagnétique et hadronique, et un spectromètre à muons

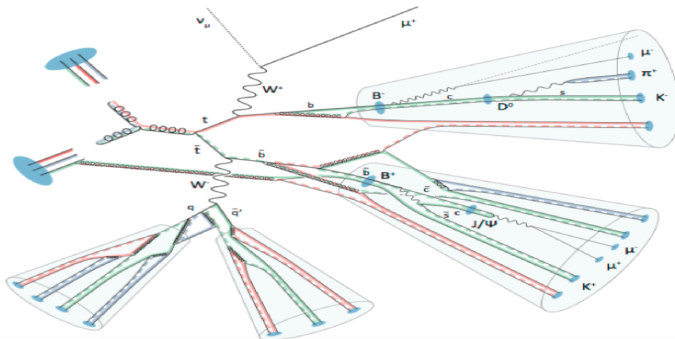
# Un événement $t\bar{t}$ avec un $J/\psi$ dans l'état final



ATLAS-CONF-2015-040

## Mésons charmés

On recherche des événements  $t\bar{t}$  avec des mésons charmés dans l'état final :



### $J/\psi$

- $J/\psi (c\bar{c}) \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- BR  $\sim 6.8 \times 10^{-4}$

### $\mu^\pm D^0$

- $\mu^\pm D^0 (c\bar{u}) \rightarrow \mu^\pm K^\pm \pi^\mp$
- BR  $\sim 3.6 \times 10^{-3}$

### $D^\pm$

- $D^\pm (c\bar{d}) \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm$
- BR  $\sim 3.2 \times 10^{-3}$

Analyse  $J/\psi$  déjà existante à 8 TeV ([ATLAS-CONF-2015-040](#), [CMS-PAS-TOP-13-007](#)). Analyses D développées durant le stage ([CMS-TOP-12-030](#), [Phys. Rev. D85 \(2012\) 052005](#), [Nucl. Phys. B864 \(2012\) 341-381](#))

# Présélection et première sélection

On sélectionne des événements "lepton+jets" dans les données et des simulations Monte Carlo ( $t\bar{t}$ , top célibataire, et autres bruits de fond Z/W, etc.)

$$- p_{T,lepton\ isole} > 25 \text{ GeV}$$

$$- \text{Un lepton et } \geq 4 \text{ jets :}$$

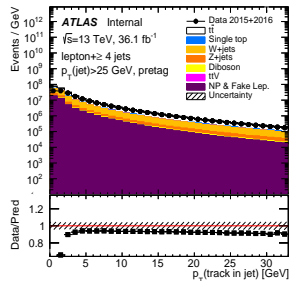
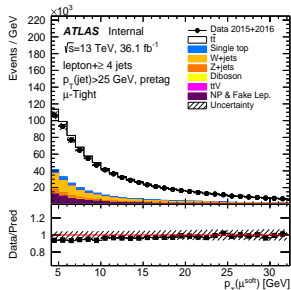
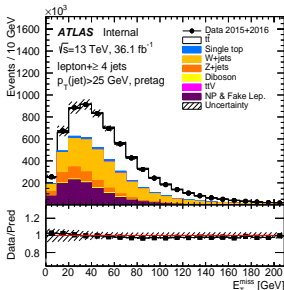
$$p_{T(jet)} > 25 \text{ GeV et } |\eta| < 2.5.$$

$$- p_{T}(\mu) > 4 \text{ GeV}$$

$$- \text{Dans un jet :}$$

$$(\Delta R(\mu, jet) < 0,5)$$

- Pour chaque muon mou, on prend toutes les traces dans le jet le contenant



$p_T = p \sin \theta$  étant l'impulsion transverse,  $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$  la pseudorapidité,  $\phi$  étant l'angle azimutal

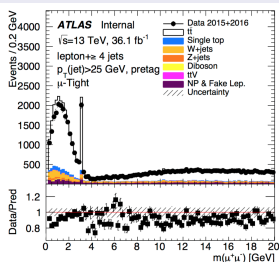
La distance  $\Delta R$  est définie dans le plan  $(\eta, \phi)$  comme  $\Delta R = \sqrt{\Delta \eta^2 + \Delta \phi^2}$

## Reconstruction des mésons charmés

Dans chaque jet, on recherche les mésons charmés :

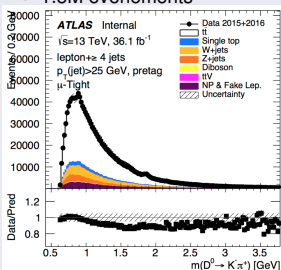
$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Deux muons de charges opposées
- $m(\mu\mu) < 20$  GeV
- $\sim 45k$  événements



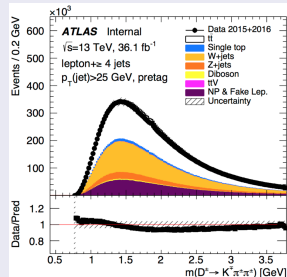
$$\mu^\pm D^0 \rightarrow \mu^\pm K^\pm \pi^\mp$$

- Trois traces de plus haut  $p_T$
- Permutations pour candidats K et  $\pi$
- $\mu$  et K de même charge
- $m(\text{trk}_{1,2}) < 20$  GeV
- $\sim 1.5M$  événements



$$D^\pm \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm$$

- Trois traces de plus haut  $p_T$
- Permutations pour candidats K et 2  $\pi$
- $m(\text{trk}_{1,2,3}) < 20$  GeV
- $\sim 24M$  événements



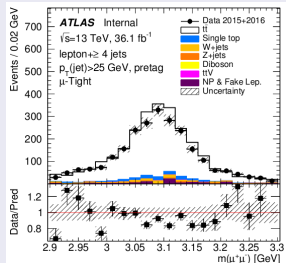


## Reconstruction des mésons charmés

On ne garde que les événements qui n'ont qu'un candidat et autour de la valeur PDG :

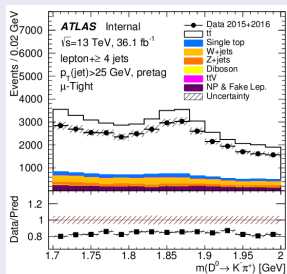
$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Deux muons de charges opposées
- $2,9 < m(\mu\mu) < 3,3 \text{ GeV}$
- $p_{T,(\mu\mu)} > 8 \text{ GeV}$
- $\sim 2516$  candidats



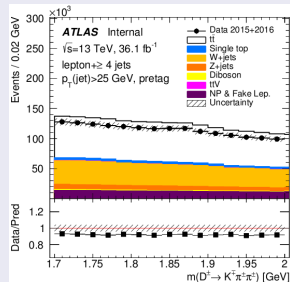
$$\mu^\pm D^0 \rightarrow \mu^\pm K^\pm \pi^\mp$$

- Trois traces de plus haut  $p_T$
- $1,7 < m(\text{trk}_{1,2}) < 2 \text{ GeV}$
- $p_{T,D^0} > 8 \text{ GeV}$
- $p_{T,\text{trk}_{1,2}} > 3 \text{ GeV}$
- $\sim 93\text{k}$  candidats



$$D^\pm \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm$$

- Trois traces de plus haut  $p_T$
- $1,7 < m(\text{trk}_{1,2,3}) < 2 \text{ GeV}$
- $p_{T,D^\pm} > 8 \text{ GeV}$
- $p_{T,\text{trk}_{1,2,3}} > 3 \text{ GeV}$
- $\sim 5\text{M}$  candidats

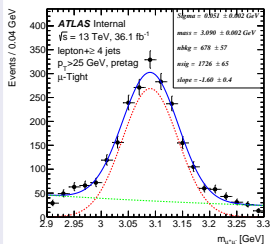


## Reconstruction des mésons charmés

Fonction d'ajustement : gaussienne pour le signal, exponentielle décroissante pour le bruit de fond

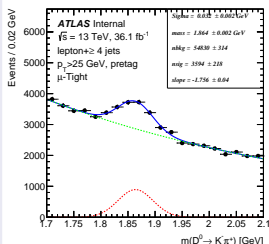
$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- $N_{signal} = 1783$
- $N_{bckg} = 723$



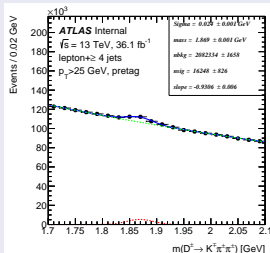
$$\mu^\pm D^0 \rightarrow \mu^\pm K^\pm \pi^\mp$$

- $N_{signal} = 3763$
- $N_{bckg} = 31 \text{ k}$



$$D^\pm \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm$$

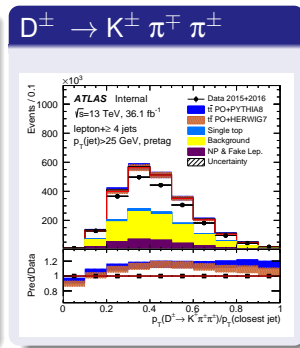
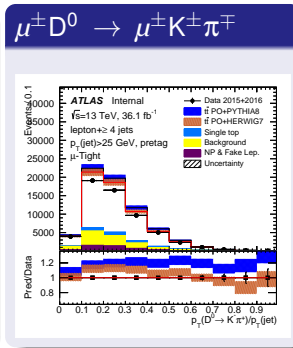
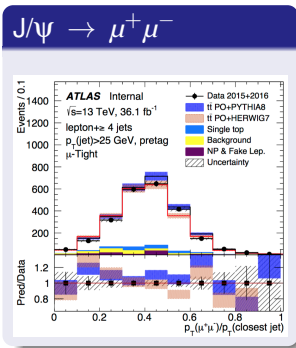
- $N_{signal} = 17002$
- $N_{bckg} = 2 \text{ M}$



Les valeurs de masse mesurées sont proches de celles du PDG à  $< 0.3 \%$  près, les traces/muons sont bien étalonnés en énergie

## Etude de la fragmentation des quarks b

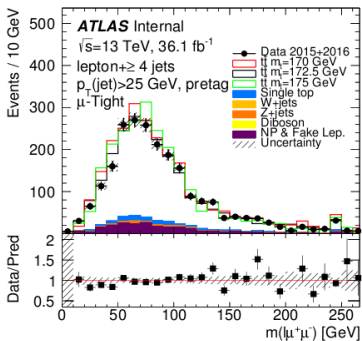
- La variable  $p_T(\text{méson})/p_T(\text{jet})$  permet d'étudier la sensibilité au modèle de fragmentation
- Comparaison entre les modèles de fragmentation : PYTHIA8 (défaut) et HERWIG7



- Les données semblent préférer HERWIG.
- Besoin d'enlever le bruit de fond pour les mésons D pour aller plus loin

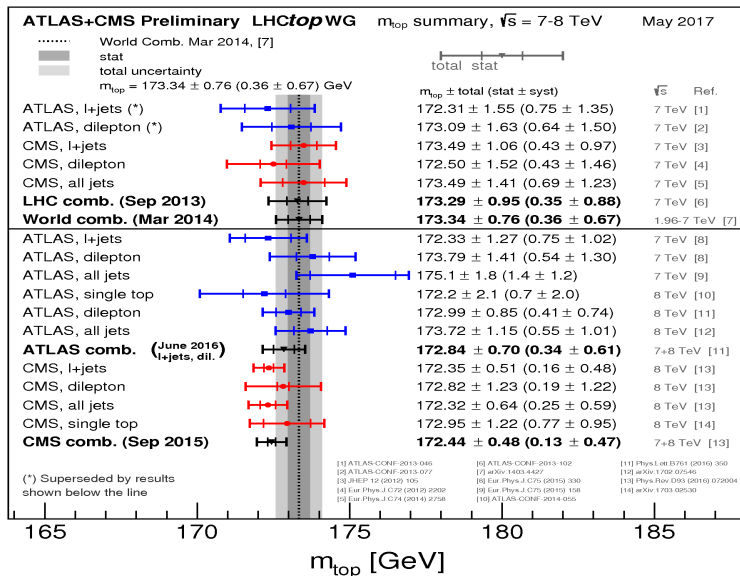
## Perspectives

- On a développé dans ce stage un code d'analyse qui permet de reconstruire, à partir d'événements  $t\bar{t}$ , les mésons  $J/\psi$ ,  $D^0$ ,  $D^\pm$  (et  $D^*(2010)^+ \rightarrow D^0\pi^+$ )
- Il permet d'étudier les modèles de fragmentation du quark b (PYTHIA8 et HERWIG7).
- Etude déjà en cours à 13 TeV pour le  $J/\psi$
- La masse du système **lepton isolé+ $J/\psi$**  est sensible à la **masse du quark top**
- Construire des **patrons** avec des lots ayant des masses du quark top **différentes**
- **Ajuster** ces lots sur les différentes masses



BACKUP

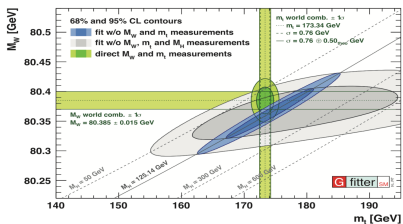
## Dernières mesures de masse



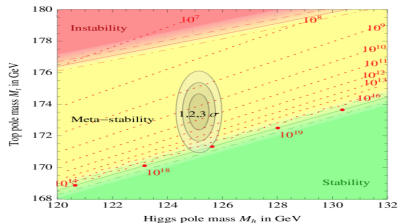
## Masse du quark top

## Ajustement électrofaible

arXiv :1407.3792

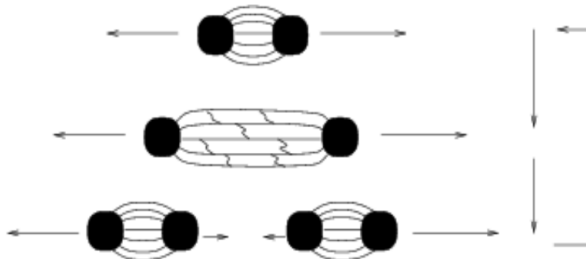


## Stabilité du potentiel de Higgs



# Fragmentation en cordes

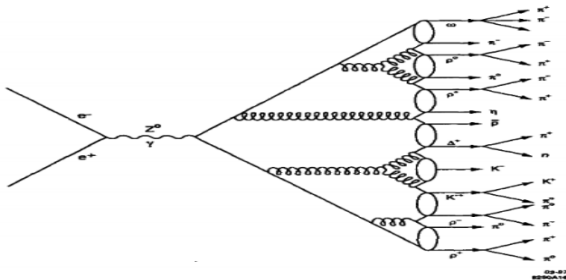
- Appelle aussi modele de Lund, ce modele est implmente dans Pythia
- Les partons sont connectes par des tubes de couleurs





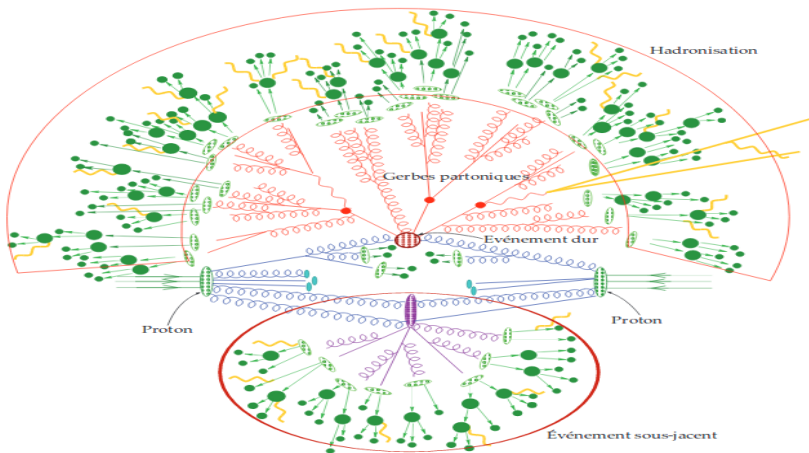
# Fragmentation en amas

- Ce modele est implemente dans Herwig
- Les partons presents a la fin de la gerbe forment de petits amas qui se scindent en des paires de quarks-antiquarks.
- Selon la masse de l'amas, ce dernier va donner : soit des hadrons soit des amas plus legers



## Simulation des événements

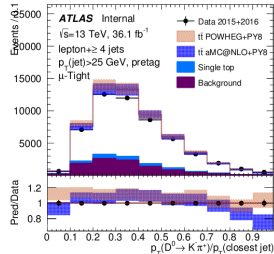
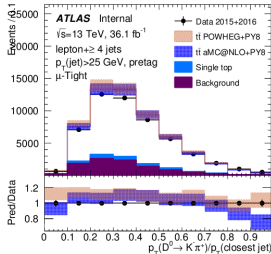
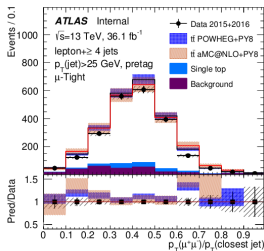
La génération des événements se fait en plusieurs étapes :



Ces événements ( $t\bar{t}$ , top célibataire et autres bruits de fond Z/W, etc.) passent ensuite sur une simulation détaillée du détecteur et peuvent être analysés comme données

# Etude de la fragmentation des quarks b

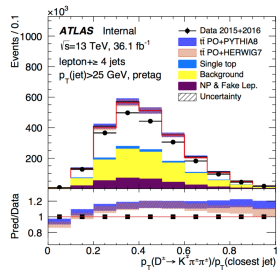
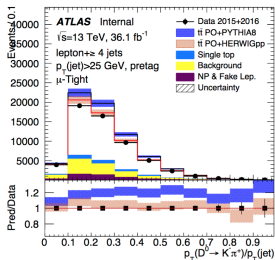
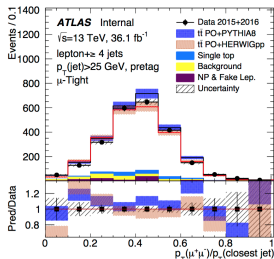
- Comparaison entre les générateurs POWHEG et aMCNLO qui simulent les interactions dures



- On remarque qu'il n'existe pas une différence entre les deux

# Etude de la fragmentation du quark b

- Comparaison entre les programmes Pythia8 et Herwig++

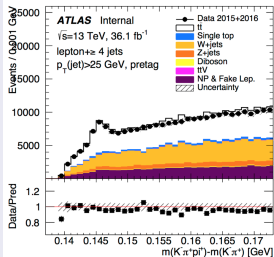


- Les données se rapprochent plus de Herwig++ que de Pythia8

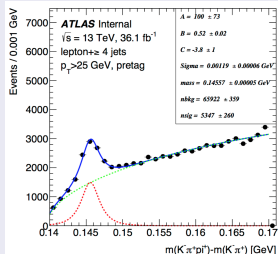
# Étude avec le méson $D^*(2010)^+$

- $D^*(2010)^+ \rightarrow D^0 \pi^+$ ,  $m(D^*(2010)^+) = 2010.26 \pm 0.05$  MeV
- Vu la masse très rapproché du  $D^*(2010)^+$  et du  $D^0$ , il suffit donc de reconstruire le  $D^0$  et de détecter le  $\pi^+$

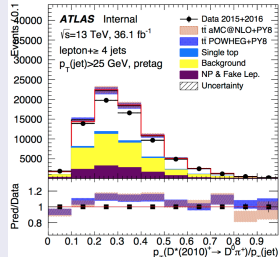
## Masse invariante



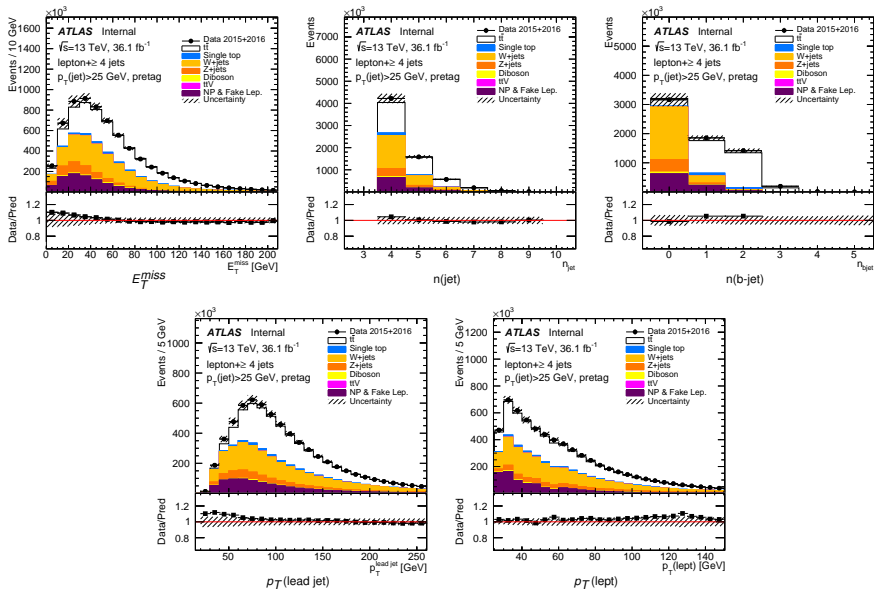
## Fit

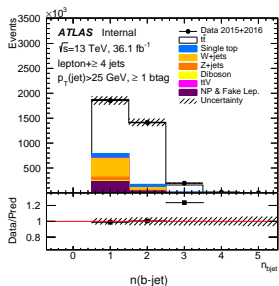
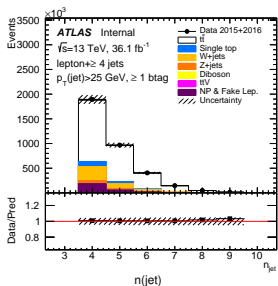
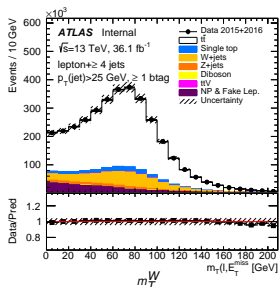
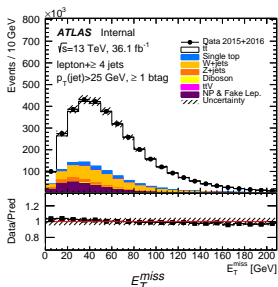


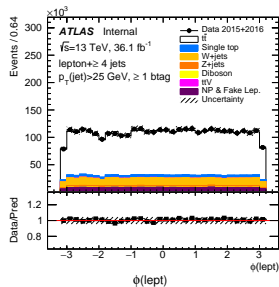
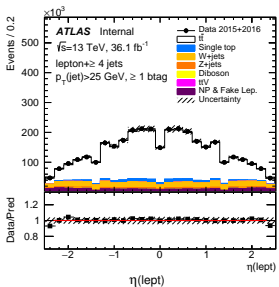
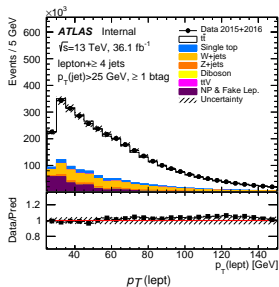
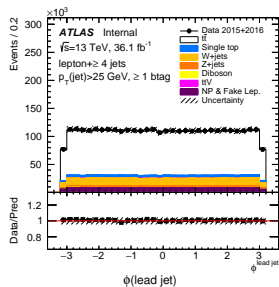
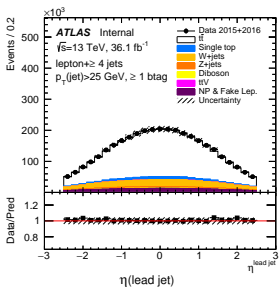
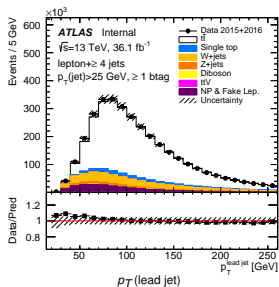
## Fragmentation



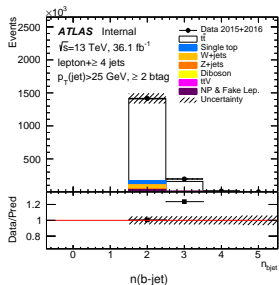
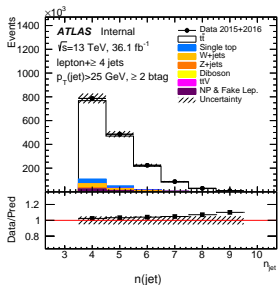
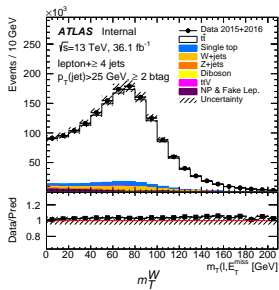
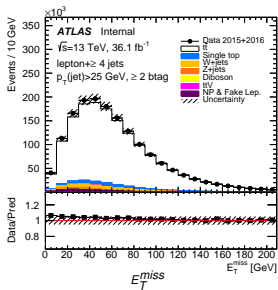
# Preselection of $t\bar{t} \rightarrow D^0$ events (pretag level)

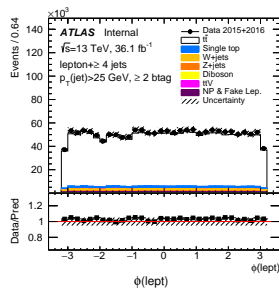
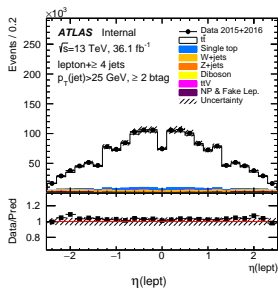
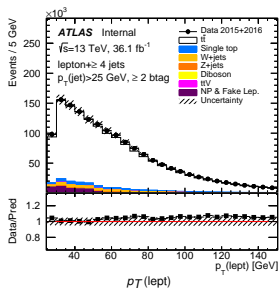
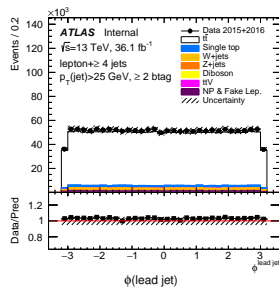
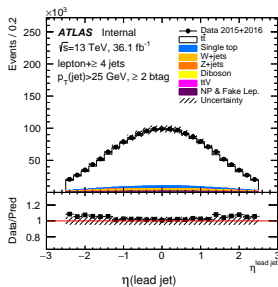
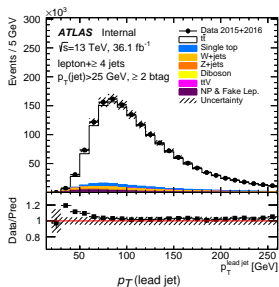


Preselection of  $t\bar{t} \rightarrow D^0$  events ( $\geq 1$  b-jet 1/2)

Preselection of  $t\bar{t} \rightarrow D^0$  events ( $\geq 1$  b-jet 2/2)

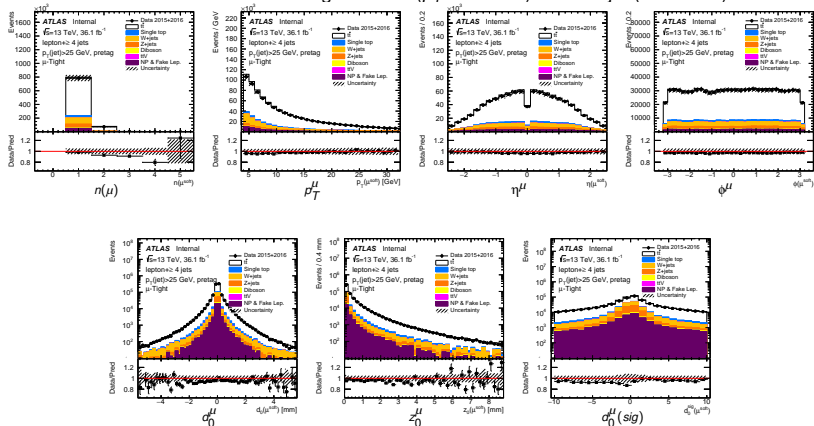


Preselection of  $t\bar{t} \rightarrow D^0$  events ( $\geq 2$  b-jet 1/2)

Preselection of  $t\bar{t} \rightarrow D^0$  events ( $\geq 2$  b-jet 2/2)

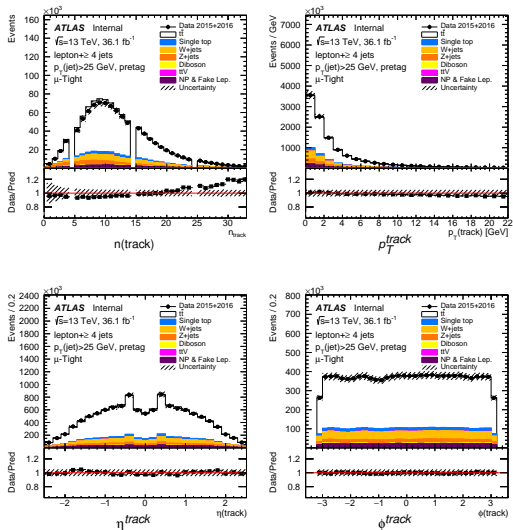
# Selection of soft muons at pretag level

Select events with at least one additional Tight muons ( $p_T > 4$  GeV) inside a jet ( $\Delta R < 0.5$ )



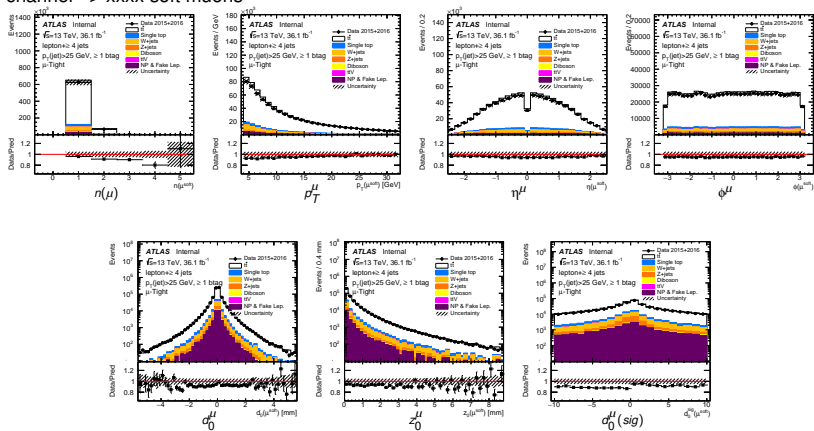
## Selection of tracks at pretag level

For each soft muon (see previous slide) select all tracks ( $p_T > 0$  GeV) inside the jet containing the soft muon ( $\Delta R < 0.4$ )



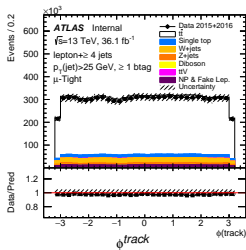
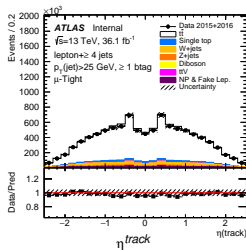
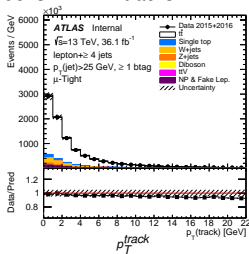
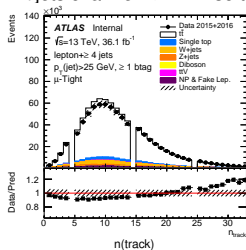
# Selection of soft muons for $\geq 1$ -b-jet

Select events with at least one additional Tight muons ( $p_T > 4$  GeV) inside a jet ( $\Delta R < 0.5$ ) : xx events in l+jets channel => xxxx soft muons



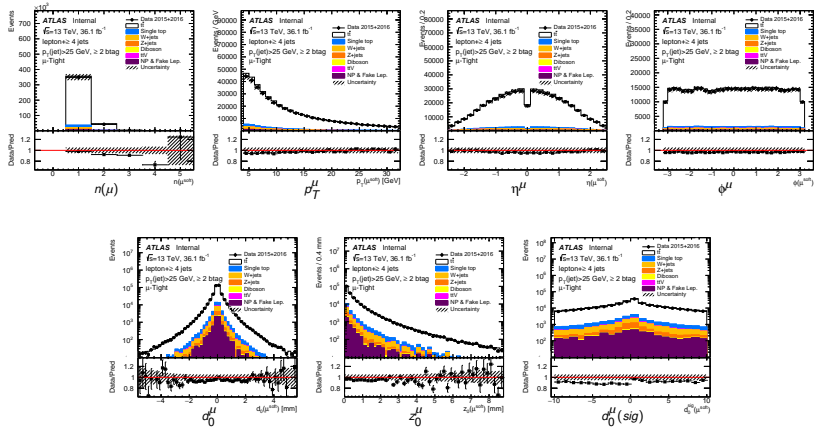
# Selection of tracks for $\geq 1$ b-jet

For each soft muon (see previous slide) select all tracks ( $p_T > 0$  GeV) inside the jet containing the soft muon ( $\Delta R < 0.4$ ) : xx events in l+jets channel => xxxx soft muons ==> xxx tracks



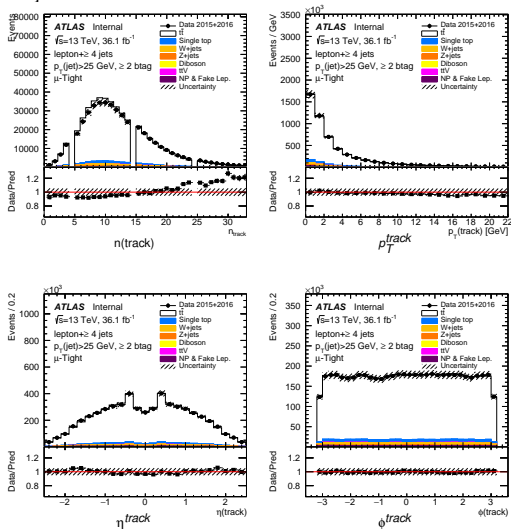
# Selection of soft muons for $\geq 2$ b-jet

Select events with at least one additional Tight muons ( $p_T > 4$  GeV) inside a jet ( $\Delta R < 0.5$ ) : xx events in l+jets channel => xxxx soft muons



# Selection of tracks for $\geq 2$ b-jet

For each soft muon (see previous slide) select all tracks ( $p_T > 0$  GeV) inside the jet containing the soft muon ( $\Delta R < 0.4$ ) : xx events in l+jets channel => xxx soft muons ==> xxx tracks





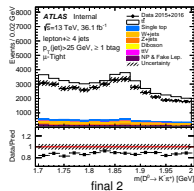
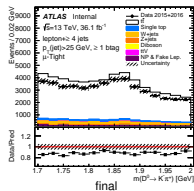
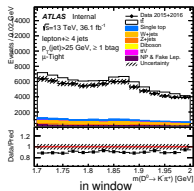
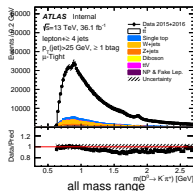
# $D^0$ -meson reconstruction ( $\geq 1$ b-jet)

For each jet/soft muon keep the three tracks with highest  $p_T$   
take opposite sign charge pairs to form a pion and a kaon

The kaon should have same charge as the soft muon

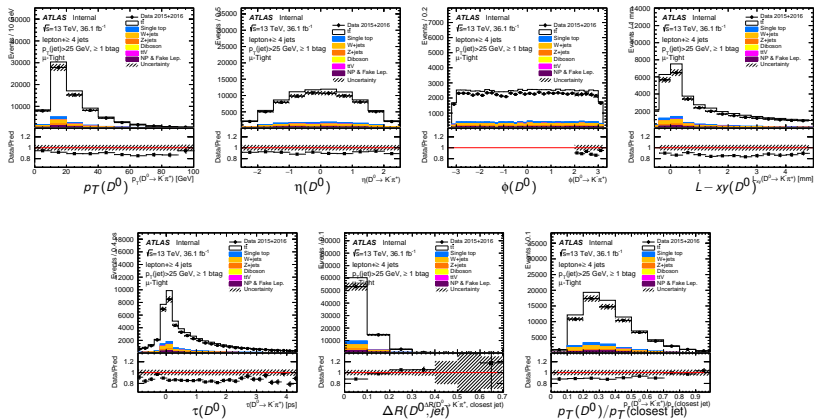
final : only one event with  $\Delta R(D^0, jet) > 0.8$ ,  $p_T(D^0) > 8$  GeV,  $\tau(D^0) > 0$  ps

final2 : as above +  $p_T(trk) > 3$  GeV



# $D^0$ -meson properties ( $\geq 1$ b-jet)

before final selection



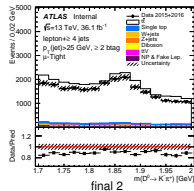
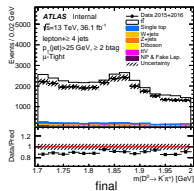
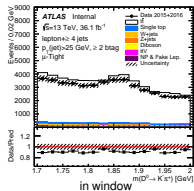
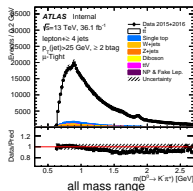
# $D^0$ -meson reconstruction ( $\geq 2$ b-jet)

For each jet/soft muon keep the three tracks with highest  $p_T$   
take opposite sign charge pairs to form a pion and a kaon

The kaon should have same charge as the soft muon

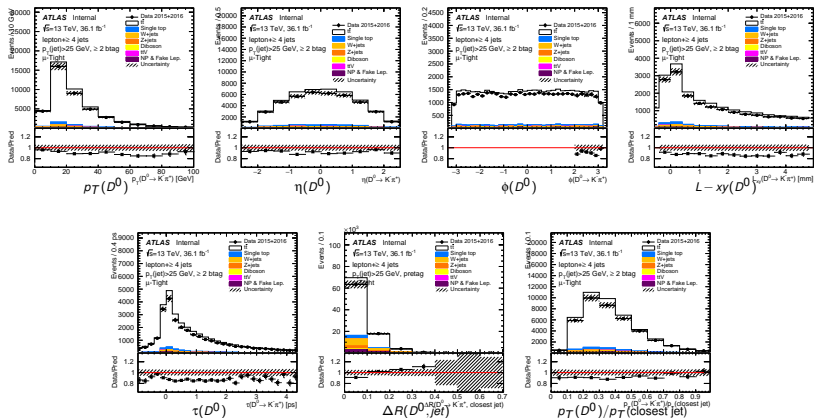
final : only one event with  $\Delta R(D^0, jet) > 0.8$ ,  $p_T(D^0) > 8$  GeV,  $\tau(D^0) > 0$  ps

final2 : as above +  $p_T(trk) > 3$  GeV



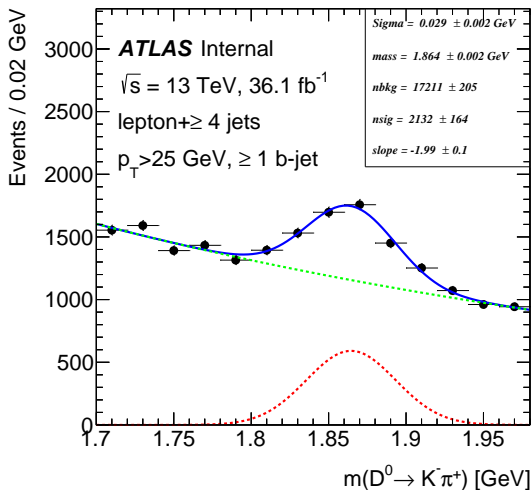
$D^0$ -meson properties ( $\geq 2$  b-jet)

before final selection



$D^0$ -meson fit ( $\geq 1$  b-jet)

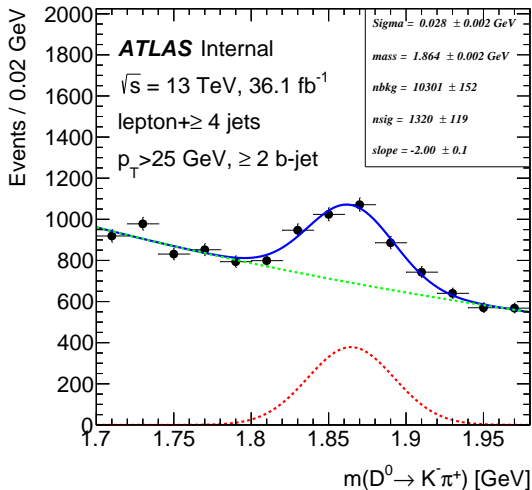
Same selection but with at least 1 b-jet



$$N_{signal} = 2131.52 \pm 164.329; N_{bckg} = 17210.9 \pm 205.136$$

$D^0$ -meson fit ( $\geq 2$  b-jet)

Same selection but with at least 2 b-jets



$$N_{signal} = 1320.37 \pm 119.184; N_{bckg} = 10301.2 \pm 152.245$$