

# Misura dei contributi primario e secondario nella produzione di mesoni D<sup>+</sup> con l'esperimento ALICE a LHC

Università degli Studi di Torino - Dipartimento di Fisica



Candidato: Fabrizio Grosa

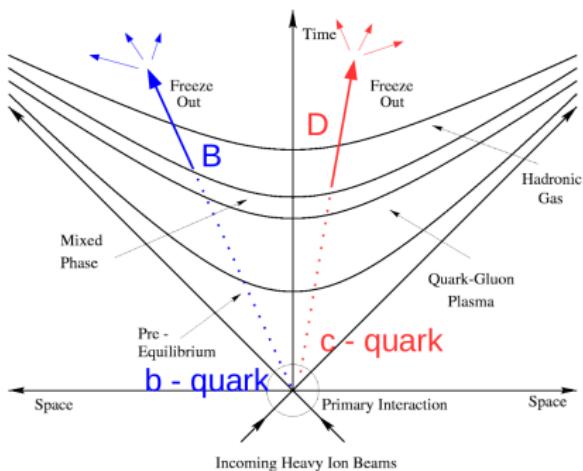
Relatore: Prof. Stefania Beolè

Primo correlatore: Dott. Francesco Prino

Secondo correlatore: Prof. Silvia Masciocchi

Controrelatore: Prof. Ernesto Migliore

# Produzione di *heavy flavours* in collisioni di ioni pesanti

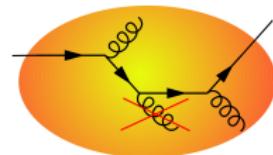


Gli *heavy flavours* (quark *c* e *b*) a causa dell'elevata massa

$$m_c \simeq 1.5 \text{ GeV/c}^2, m_b \simeq 4.5 \text{ GeV/c}^2$$

vengono prodotti nella fase iniziale della collisione (*fase di pre-equilibrio*)

$$\tau_{prod} \sim \frac{\hbar}{m_{b,c}} \sim 0.05 - 0.1 \text{ fm/c}$$



Se nella collisione si crea un mezzo deconfinato (*Quark-Gluon Plasma*), gli *heavy flavours* interagiscono con esso perdendo energia a causa di scattering elastici con i partoni del mezzo stesso e per radiazione di gluoni (*gluonsstrahlung*)

$$\langle \Delta E \rangle \propto \alpha_s C_R \hat{q} L^2$$

$$\theta < \frac{M_q}{E_g} \quad \text{DEAD CONE EFFECT}$$

# Open heavy flavours in collisioni p-Pb

Nelle collisioni p-Pb non si raggiungono le condizioni per la formazione di un QGP esteso  $\Rightarrow$  ci permettono di studiare i *Cold Nuclear Matter Effects*

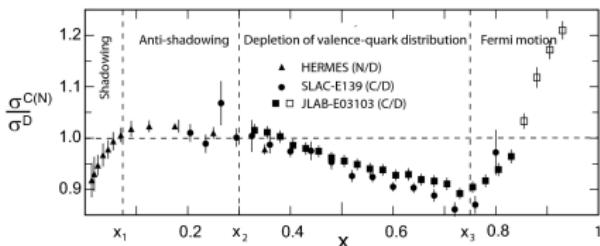
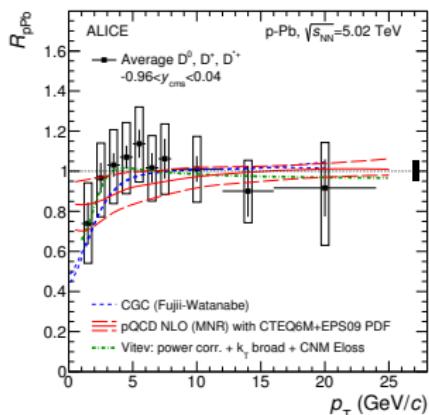
- Cronin Enhancement

Le collisioni multiple dei partoni del proiettile con i nucleoni del nucleo determinano uno *shift* dello spettro a più alti valori di  $p_T$

## Nuclear modification factor

$$R_{pPb}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{pPb}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$

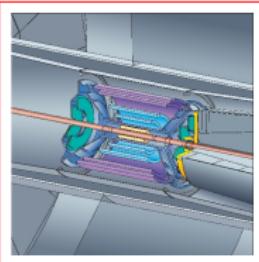
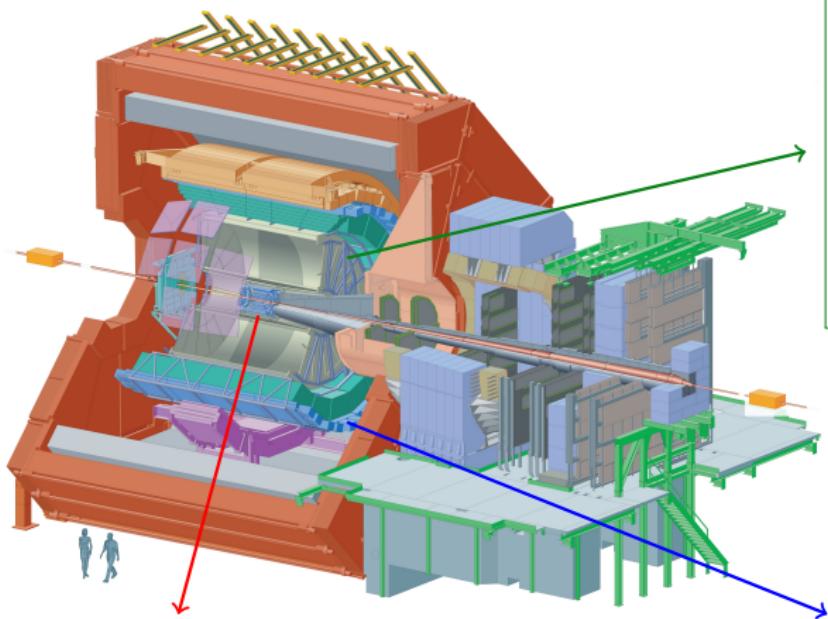
- Modifica delle PDF in presenza di materia nucleare



Si possono distinguere quattro regioni:

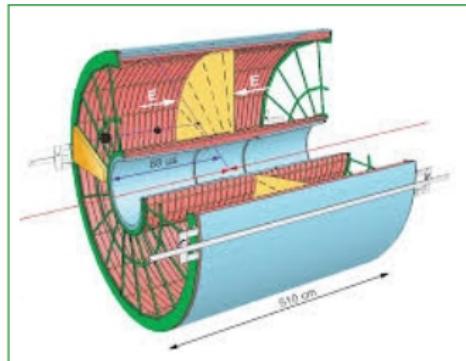
- $x \lesssim 0.1 \rightarrow shadowing\ region$
- $0.1 \lesssim x \lesssim 0.2 \rightarrow anti-shadowing\ region$
- $0.2 \lesssim x \lesssim 0.8 \rightarrow EMC\ effect$
- $x \gtrsim 0.8 \rightarrow moto\ di\ Fermi$

# A Large Ion Collider Experiment

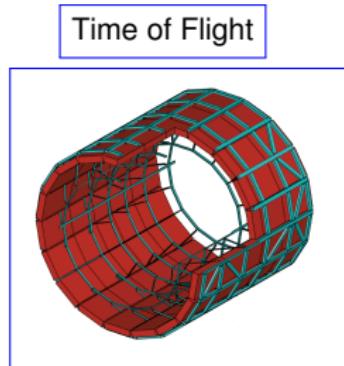


Inner Tracking System

- 2 layer Silicon Pixel Detector
- 2 layer Silicon Drift Detector
- 2 layer Silicon Strip Detector



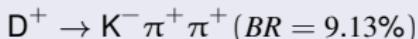
Time Projection Chamber



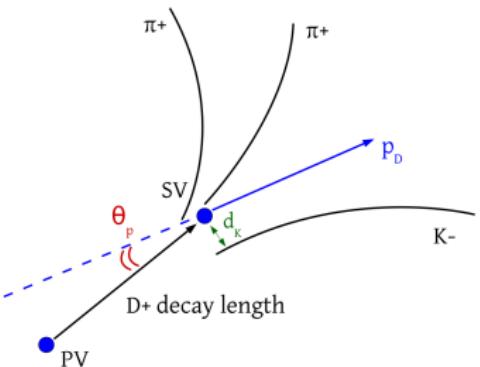
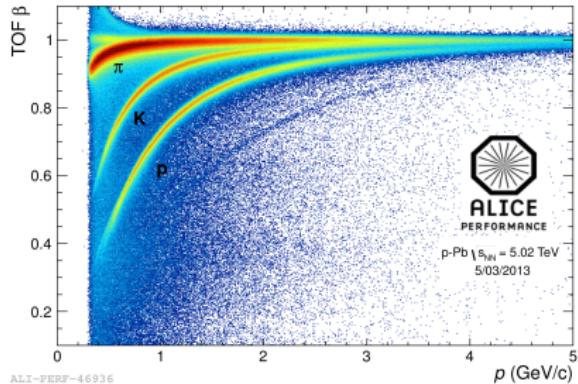
Time of Flight

# Ricostruzione e selezione di mesoni D<sup>+</sup> in ALICE

Meson D<sup>+</sup> ( $c\tau = 312 \mu\text{m}$ ) ricostruiti nel canale di decadimento adronico



- Il segnale è estratto con un'[analisi di massa invariante](#)
- Vengono applicate selezioni topologiche sulle quantità ricostruite per ridurre il fondo combinatoriale



- Per rimuovere ulteriormente del fondo viene applicata la *Particle Identification* (PID) nella selezione delle tracce nello stato finale

# Mesoni D<sup>+</sup> primari e secondari

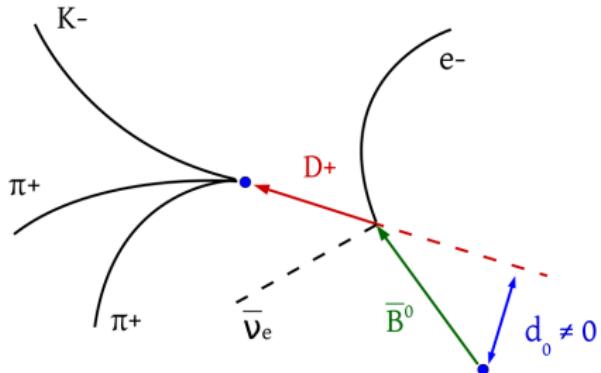
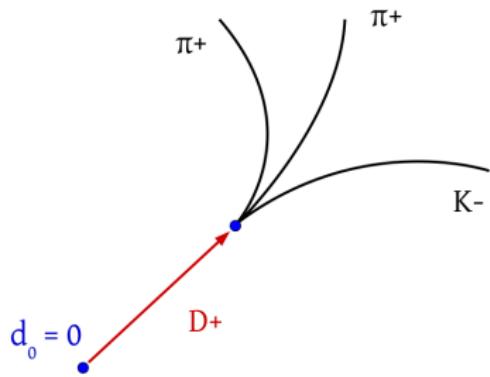
Per la misura dei mesoni D<sup>+</sup> che sono originati da un quark *charm* prodotto nella collisione è necessario separare il contributo di D<sup>+</sup> prompt dal segnale totale

## D<sup>+</sup> primari (*prompt*)

Derivano direttamente  
dall'adronizzazione di un quark *c*  
 $c \rightarrow D^+$

## D<sup>+</sup> secondari (*feed-down*)

Derivano dal decadimento di un  
mesone B  
 $b \rightarrow B \rightarrow D^+ + X$



# Metodi *theory-driven* per la misura della frazione di mesoni D<sup>+</sup> prompt

La frazione di D<sup>+</sup> prompt può essere ottenuta utilizzando metodi *theory-driven*

- Metodo  $N_b$

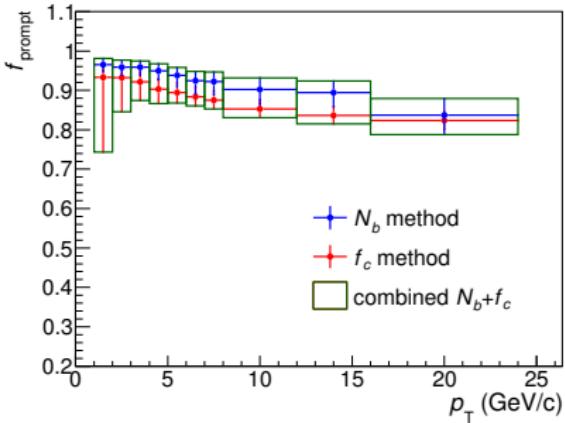
$$f_{prompt} = 1 - A \cdot \left( \frac{d^2 \sigma}{dp_T dy} \right)_{FONLL}^{feed-down} R_{pPb}^{feed-down}(p_T) \frac{(Acc \times \epsilon)_{feed-down} \cdot \Delta y \Delta p_T \cdot BR \cdot L_{int}}{N_{raw}^{D^\pm}/2}$$

- Metodo  $f_c$

$$f_{prompt} = \left( 1 + \frac{\frac{d^2 \sigma}{dp_T dy}^{feed-down}_{FONLL} \cdot (Acc \times \epsilon)_{feed-down} \cdot R_{pPb}^{feed-down}(p_T)}{\frac{d^2 \sigma}{dp_T dy}^{prompt}_{FONLL} \cdot (Acc \times \epsilon)_{prompt} \cdot R_{pB}^{prompt}(p_T)} \right)^{-1}$$

Principali sorgenti di errore sistematico:

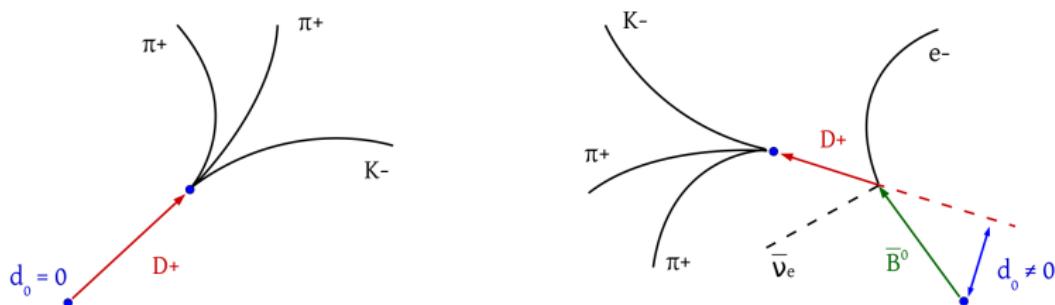
- Calcolo perturbativo di  $\left( \frac{d^2 \sigma}{dp_T dy} \right)_{FONLL}$
- $R_{pPb}^{feed-down}(p_T)$  mai misurato  
⇒ necessità di un'assunzione



# Sommario

# Metodo di fit del parametro di impatto

Si basa sulla differenza tra le distribuzioni del parametro di impatto ( $d_0$ ) di mesoni  $D^+$  prompt e feed-down:



## 1 Determinazione dei *template* (fase di *prefit*)

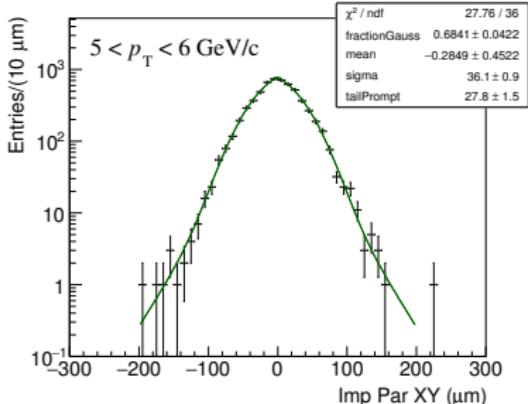
- Fit sulle distribuzioni simulate di mesoni  $D^+$  prompt
- Fit sulle distribuzioni simulate di mesoni  $D^+$  feed-down
- Fit sulle distribuzioni del fondo combinatoriale ottenute dai dati nelle regioni di massa invariante a lato del picco (*side-bands*)

Nella fase di prefit si ottengono i parametri che vengono successivamente fissati nel fit finale dei dati per estrarre la frazione di mesoni  $D^+$  prompt

## 2 Fit unbinned dei dati

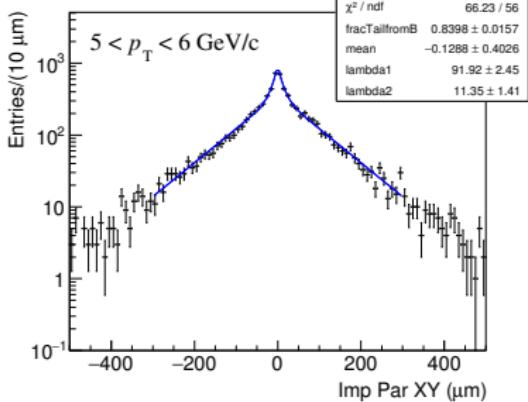
La funzione di fit finale è somma dei singoli contributi

# Fit delle distribuzioni simulate di $D^+$ prompt e feed-down



$D^+$  prompt: fit della distribuzione del parametro di impatto *simulato*

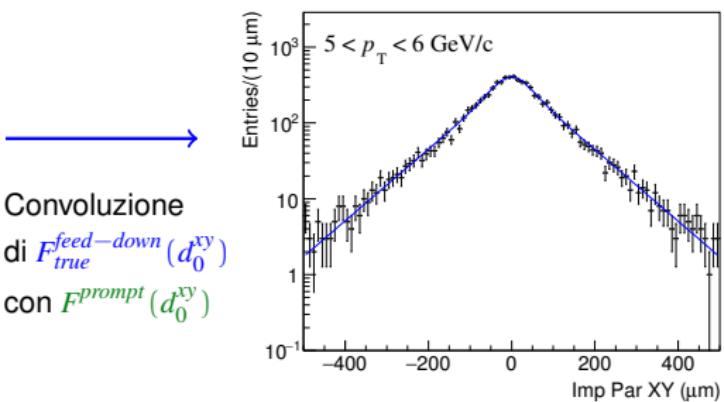
→ somma di una Gaussiana e una funzione esponenziale simmetrica rispetto al valor medio



$D^+$  feed-down: fit della distribuzione del parametro di impatto *vero*

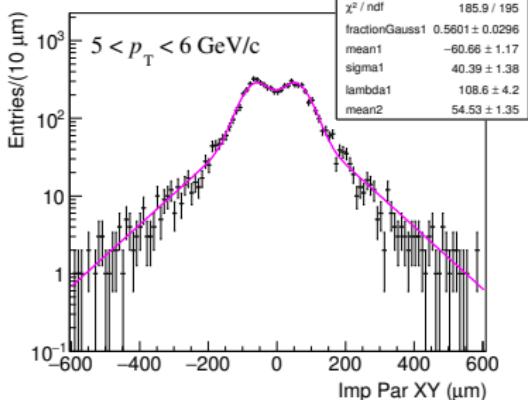
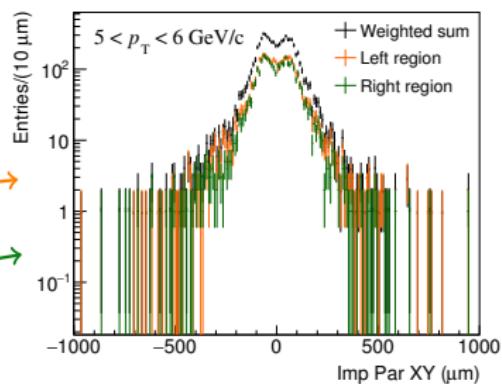
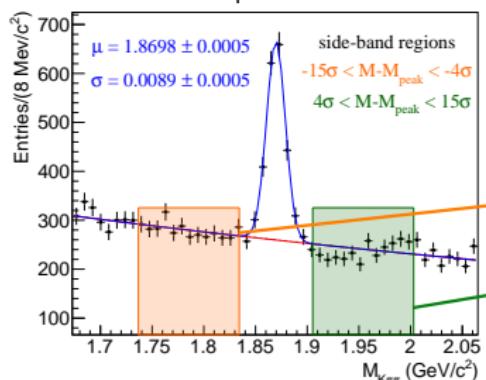
→ somma di due funzioni esponenziali simmetriche rispetto al valor medio

→  
Convoluzione  
di  $F_{\text{true}}^{\text{feed-down}}(d_0^{\text{xy}})$   
con  $F^{\text{prompt}}(d_0^{\text{xy}})$



# Fit delle distribuzioni del fondo combinatoriale

$5 < p_T < 6 \text{ GeV}/c$



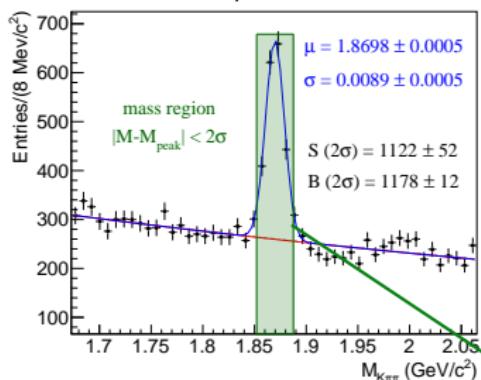
**Fondo combinatoriale:** fit della distribuzione del parametro di impatto ottenuta dalle regioni di massa invariante a lato del picco (*side-bands*)

$$4\sigma < |M - M_{\text{peak}}| < 15\sigma$$

→ somma di due Gaussiane con code esponenziali, con i parametri uguali a meno dei valori medi

# Fit unbinned dei dati

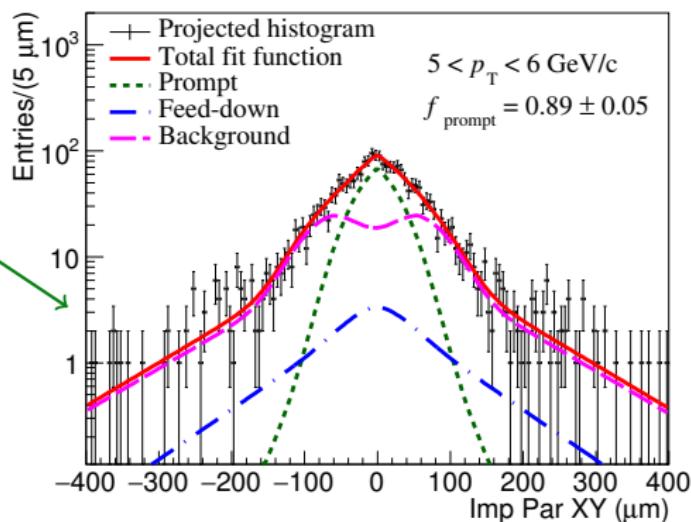
$5 < p_T < 6 \text{ GeV}/c$



- Parametri liberi:  $f_{prompt}$ ,  $\sigma_{prompt}$
- $S$  è fissato al valore del segnale ottenuto dal fit della massa invariante (*raw yield*)
- $N$  è fissato al numero di conteggi

Intervallo di massa invariante considerato

$$|M - M_{peak}| < 2\sigma$$



$$F(d_0^{xy}) = N \cdot \left\{ \frac{S}{N} \left[ f_{prompt} F^{prompt}(d_0^{xy}) + (1 - f_{prompt}) F^{feed-down}(d_0^{xy}) \right] + \frac{N - S}{N} F^{bkg}(d_0^{xy}) \right\}$$

# Valutazione degli errori sistematici

Sorgenti di errore sistematico:

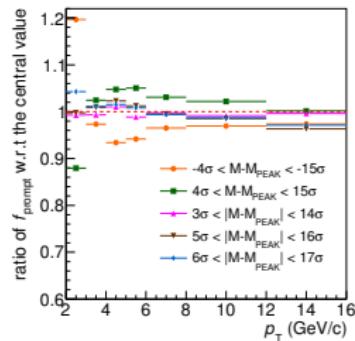
## 1 Imperfetta descrizione delle distribuzioni

- Forma delle distribuzioni del parametro di impatto di  $D^+$  prompt e feed-down nella simulazione Monte Carlo e del fondo combinatoriale nelle side-bands
- Forma delle distribuzioni di  $p_T$  di mesoni  $D^+$  e  $B$  generati nella simulazione Monte Carlo

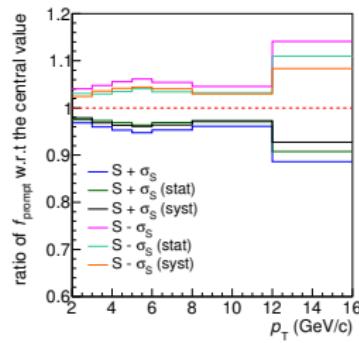
## 2 Incertezza sulla valore del segnale $S$

## 3 Consistenza e stabilità del procedimento

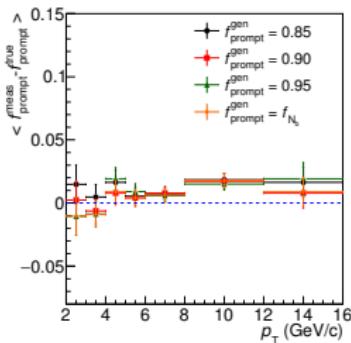
### 1 Variazione del range di massa invariante per la parametrizzazione del fondo



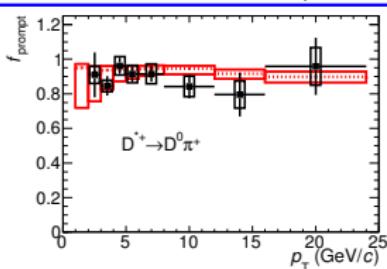
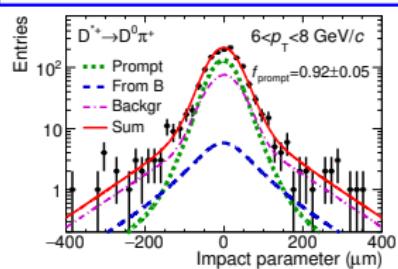
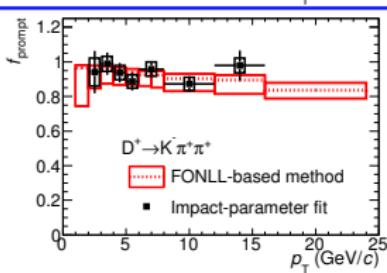
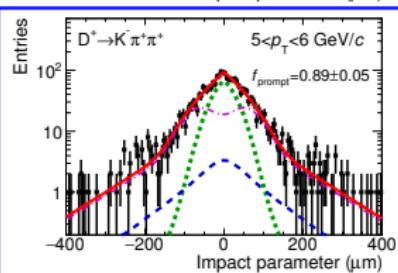
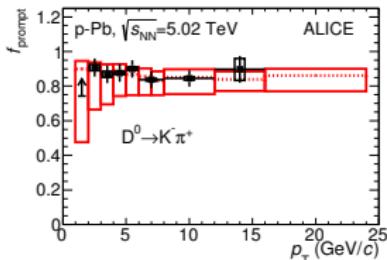
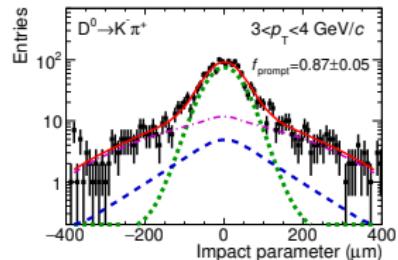
### 2 Variazione della quantità di segnale $S$ nel fit tra $S - \sigma_S$ e $S + \sigma_S$



### 3 Test Monte Carlo per valutare la bontà del procedimento



# Fit del parametro di impatto - Risultato



- La frazione di  $D^+$  prompt misurata con il metodo del fit del parametro di impatto è compatibile con i metodi *theory-driven*
- L'incertezza totale è compatibile con i metodi *theory-driven* a  $p_T$  intermedio e maggiore ad alto e basso  $p_T$
- Risultato inserito come cross-check nell'articolo *D-meson production in  $p\text{-Pb}$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  and in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$*  pubblicato dalla Collaborazione ALICE

# Metodo della variazione dei tagli

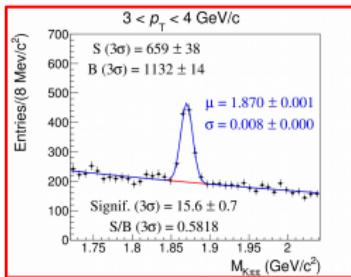
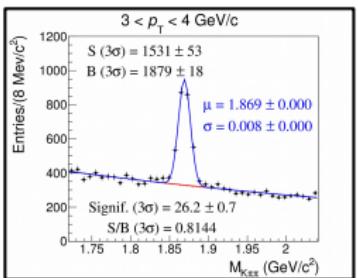
I candidati mesoni  $D^+$  includono  $D^+$  prompt,  $D^+$  feed-down e il fondo combinatoriale

Applicando selezioni su quantità topologiche per massimizzare il rapporto segnale su fondo e la significatività statistica

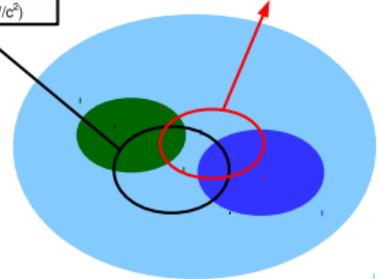
$$signif. = \frac{S}{\sqrt{S+B}},$$

se ne seleziona soltanto una parte

$$\begin{cases} \epsilon_1^{prompt} \cdot N_{prompt} + \epsilon_1^{feed-down} \cdot N_{feed-down} = Y_1 \\ .. \\ .. \\ \epsilon_n^{prompt} \cdot N_{prompt} + \epsilon_n^{feed-down} \cdot N_{feed-down} = Y_n \end{cases}$$



- Background
- Prompt  $D^+$
- Feed-down  $D^+$



Per ogni set di tagli definito si ottiene un'equazione che ha come incognite il numero corretto di mesoni  $D^+$  prompt e feed-down ( $N_{prompt}$  e  $N_{feed-down}$ )  
⇒ per  $n$  set di tagli si ottiene un sistema sovradeterminato

# Metodi di minimizzazione

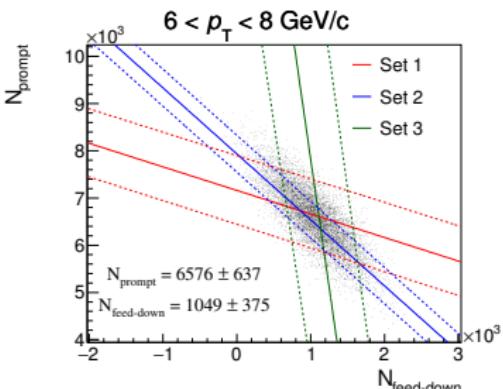
- Minimizzazione analitica

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1^{prompt} & \epsilon_1^{feed-down} \\ \epsilon_2^{prompt} & \epsilon_2^{feed-down} \\ .. & .. \\ \epsilon_n^{prompt} & \epsilon_n^{feed-down} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_{prompt} \\ N_{feed-down} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ .. \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ .. \\ \delta_n \end{pmatrix}$$

Il vettore nullo è sostituito dal vettore dei residui  $\delta$

Il numero corretto di mesoni  $D^+$  prompt e feed-down e la matrice delle covarianze associata sono ottenuti dalla minimizzazione del  $\chi^2 = \boldsymbol{\delta}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\delta}$

- Determinazione dell'incentro



$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta_1}^2 & & & \\ & \sigma_{\delta_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{\delta_n}^2 \end{pmatrix}$$

Ogni equazione corrispondente ad un set di tagli descrive una retta nel piano  $(N_{prompt}, N_{feed-down})$   
⇒ le intersezioni di tre rette definiscono un triangolo  
⇒  $N_{prompt}$  e  $N_{feed-down}$  sono determinati dalle coordinate dell'incentro del triangolo

L'errore statistico è valutato con una simulazione Monte Carlo, estraendo i parametri delle rette da delle distribuzioni Gaussiane

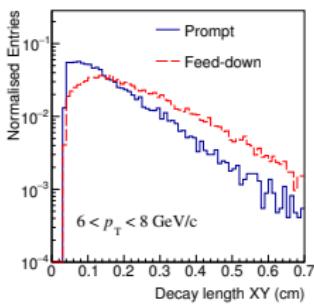
# Strategia per la scelta dei set di tagli

Sono stati utilizzati tre set di tagli il più possibile **scorrelati**:

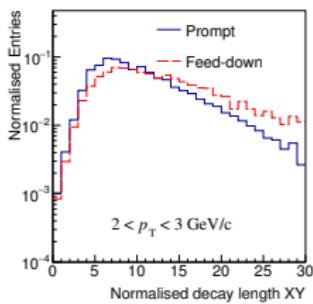
- 1<sup>o</sup> set: aumento dell'efficienza di selezione dei mesoni D<sup>+</sup> prompt
- 2<sup>o</sup> set: intermedio (buon estrazione del segnale)
- 3<sup>o</sup> set: aumento dell'efficienza di selezione dei mesoni D<sup>+</sup> feed-down

Variabili topologiche usate per definire i set di tagli:

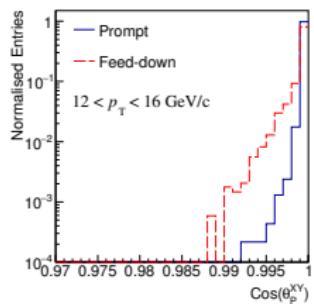
- Lunghezza di decadimento nel piano trasverso



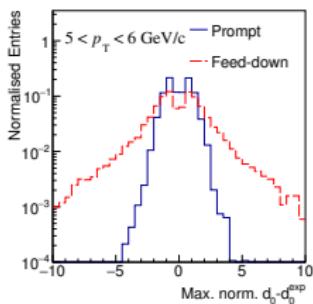
- Lunghezza di decadimento nel piano trasverso normalizzata al proprio errore



- Coseno dell'angolo di pointing nel piano trasverso



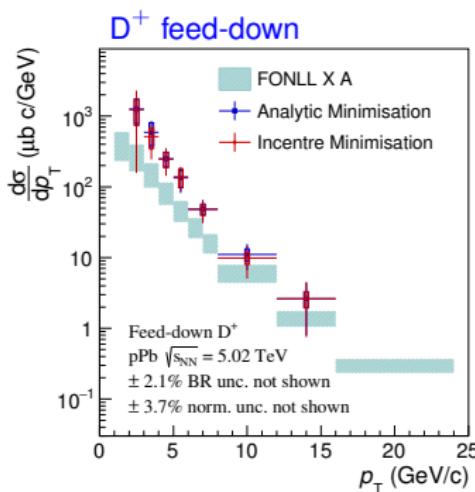
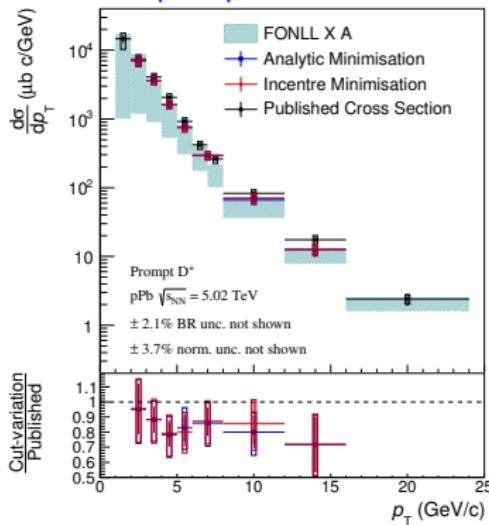
- Massima differenza normalizzata tra il parametro di impatto atteso e misurato delle tracce figlie



# Metodo della variazione dei tagli

## Risultato

$D^+$  prompt



- La sezione d'urto differenziale in  $p_T$  di produzione dei mesoni  $D^+$  prompt  $\Rightarrow$  compatibile con il risultato pubblicato e la predizione di FONLL
- La sezione d'urto differenziale in  $p_T$  di produzione dei mesoni  $D^+$  feed-down  $\Rightarrow$  sistematicamente maggiore rispetto alla predizione di FONLL

$$\left. \frac{d\sigma_X^{D^+}}{dp_T} \right|_{|y|<0.5} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_X^{D^\pm}|_{|y|<y_{fid}}}{\Delta p_T \Delta y \cdot (Acc)_X} \cdot BR$$

Sorgenti di errore sistematico:

- Estrazione del segnale
- Efficienza di selezione dei tagli topologici
- Imperfetta descrizione delle distribuzioni di  $p_T$  di mesoni  $D^+$  e  $B$  generati nella simulazione Monte Carlo

# Ricostruzione dei mesoni D<sup>+</sup> con il filtro di Kalman

## Filtro di Kalman

Algoritmo che permette di stimare un vettore di stato  $\mathbf{r}$  e la sua matrice delle covarianze  $\mathbf{C}$  a partire da  $n$  misure  $\mathbf{m}_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ) contenenti rumore statistico



## KFParticle package

Pacchetto per la ricostruzione di vertici di decadimento sviluppato per l'esperimento CBM basato sul filtro di Kalman



vettore di stato:

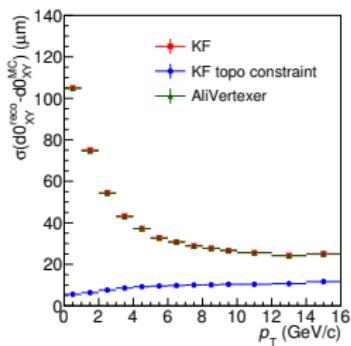
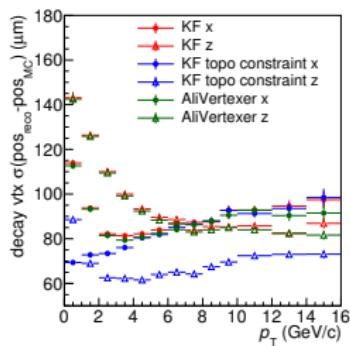
$$\mathbf{r} = (x, y, z, p_x, p_y, p_z, E, s)$$

## Vantaggi del KFParticle package:

- Valutazione del vettore di stato e della matrice di covarianza lungo la traiettoria della particella valutata con il filtro di Kalman
- Possibilità di fissare dei vincoli  $\Rightarrow$  mass constraint, topological constraint

Test delle performance eseguito sulla simulazione Monte Carlo selezionando i mesoni D<sup>+</sup> prompt  
 $\Rightarrow$  risoluzione della variabile X:

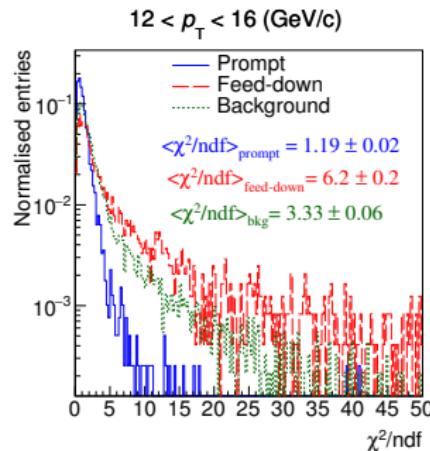
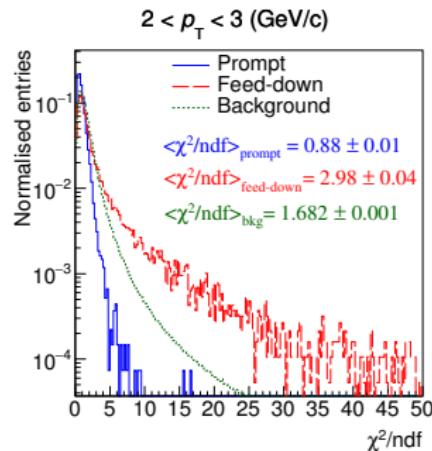
$$Res(p_T) = \sigma(X_{reco} - X_{MC})(p_T)$$



# Distribuzioni di $\chi^2/ndf$ dopo l'applicazione del *topological constraint*

I mesoni D<sup>+</sup> feed-down **non** derivano dal vertice primario di interazione dei fasci

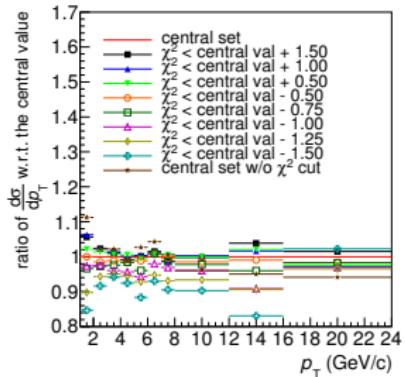
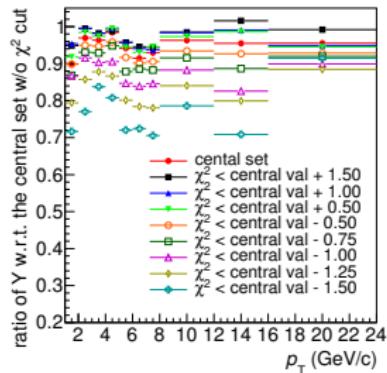
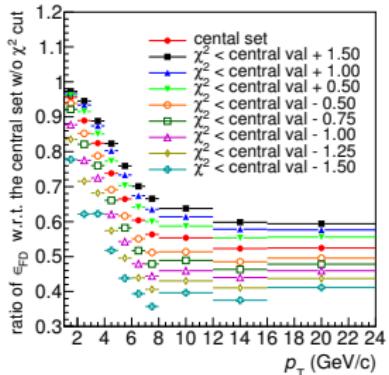
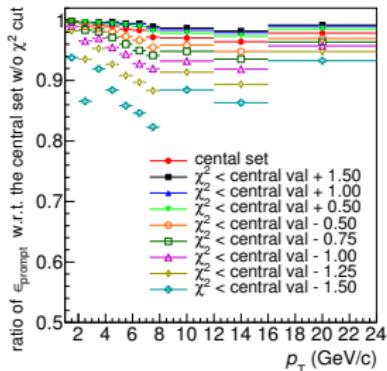
⇒ L'applicazione del **topological constraint** permette di ridurre il contributo di mesoni D<sup>+</sup> da B, valutando il  $\chi^2$  della particella ricostruita



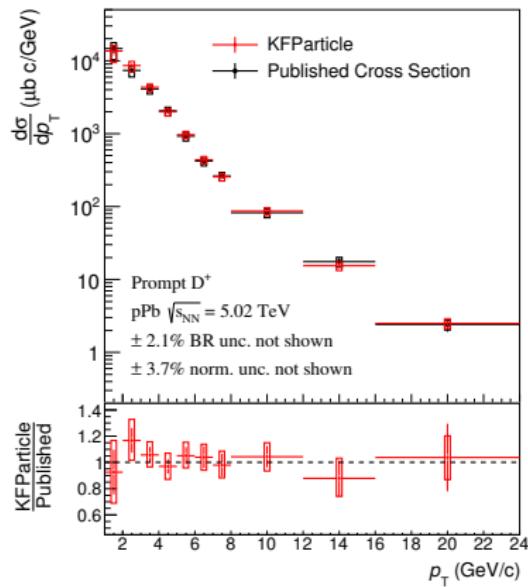
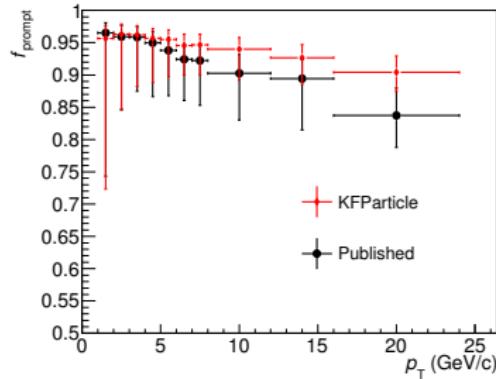
⇒ selezione su  $\chi^2/ndf$  delle candidate, oltre alle selezioni sulle quantità topologiche usate nell'analisi standard

$p_T \text{ (GeV/c)}$	[1, 2]	[2, 8]	[8, 16]	[16, 24]
$\chi^2/ndf$	< 2.5	< 3.0	< 3.5	< 4.0

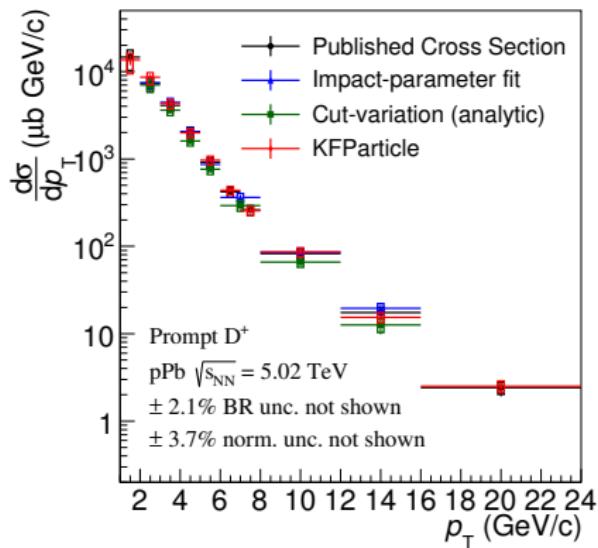
# Studio della variazione della selezione su $\chi^2/ndf$



# Ricostruzione dei mesoni D<sup>+</sup> con il filtro di Kalman - Risultato

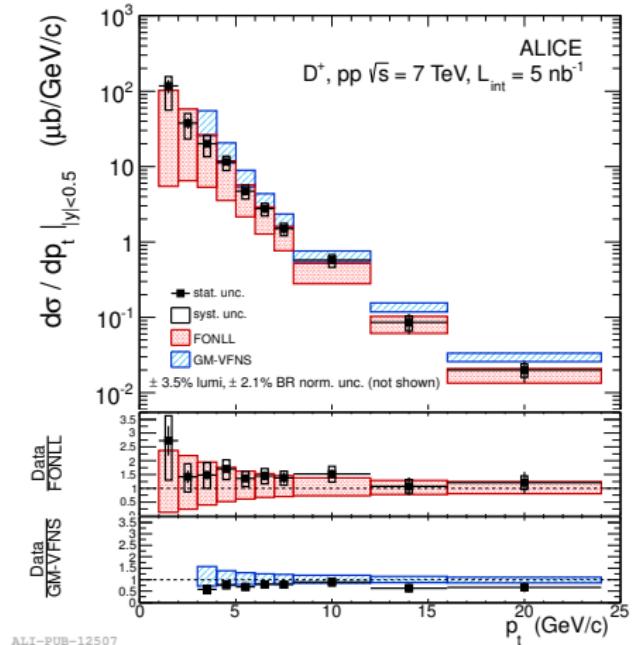


## Conclusioni e confronto

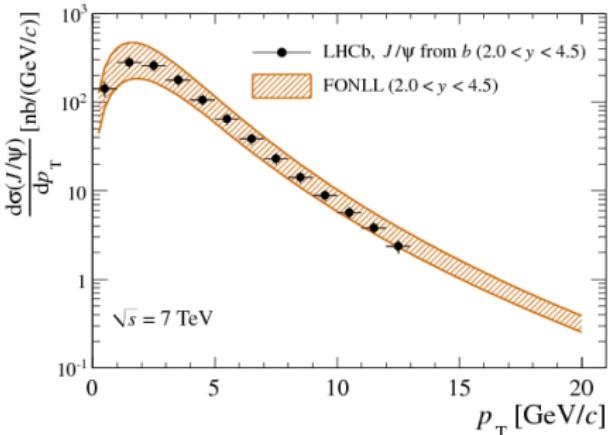


# BACKUP

# Confronto dei dati con la predizione di FONLL in collisioni pp



ALI-PUB-12507



Le sezioni d'urto per adroni contenenti *charm* e *beauty* misurate in collisioni pp sono in accordo con la predizione di FONLL  
⇒ nei metodi *theory-driven* la sezione d'urto è calcolata utilizzando FONLL