

Misura dei contributi primario e secondario nella produzione di mesoni D⁺ con l'esperimento ALICE a LHC

Laurea Magistrale in Fisica

Curriculum: Fisica Nucleare e Subnucleare



ALICE

Università degli Studi di Torino - Dipartimento di Fisica

22 luglio 2016

Relatore: Prof. Stefania Beolè

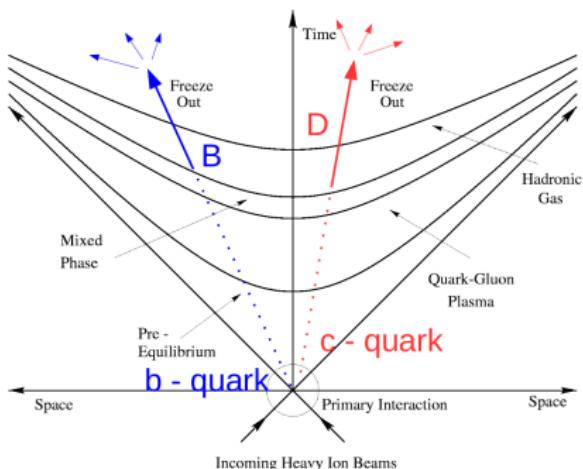
Candidato: Fabrizio Grosa

Primo correlatore: Dott. Francesco Prino

Secondo correlatore: Prof. Silvia Masciocchi

Controrelatore: Prof. Ernesto Migliore

Produzione di *heavy flavours* in collisioni di ioni pesanti

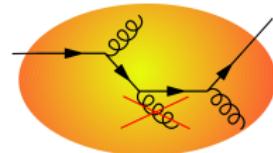


Gli *heavy flavours* (quark pesanti c e b) a causa dell'elevata massa

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

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*)

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

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

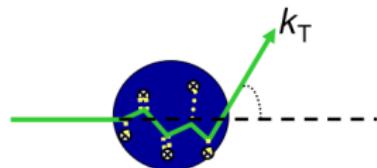
La radiazione di gluoni dipende dalla massa del quark, in particolare risulta soppressa per

Open heavy flavours in collisioni p-Pb

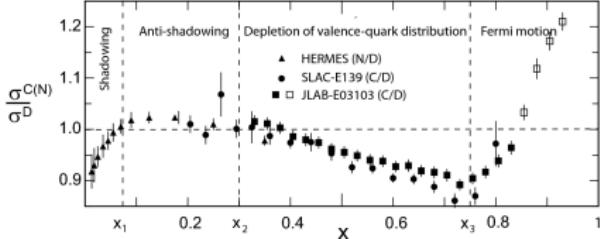
Nelle collisioni p-Pb non si raggiungono le condizioni per la formazione di un QGP esteso \Rightarrow ci permettono di studiare i *Cold Nuclear Matter Effects*

● Cronin Enhancement

Le collisioni multiple dei partoni del proiettile con i nucleoni del nucleo prima dell'*'hard scattering'* determinano uno *shift* dello spettro a più alti valori di momento trasverso

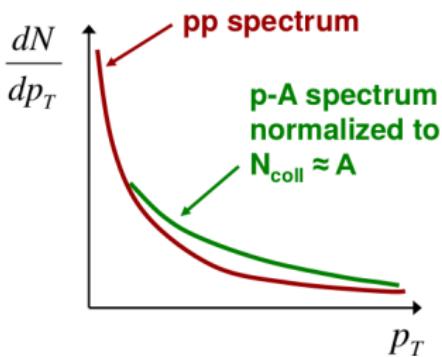


● Modifica delle PDF in presenza di materia nucleare



Open heavy flavours

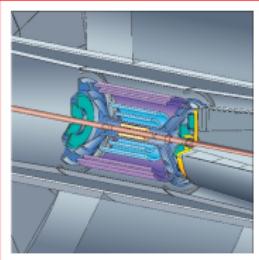
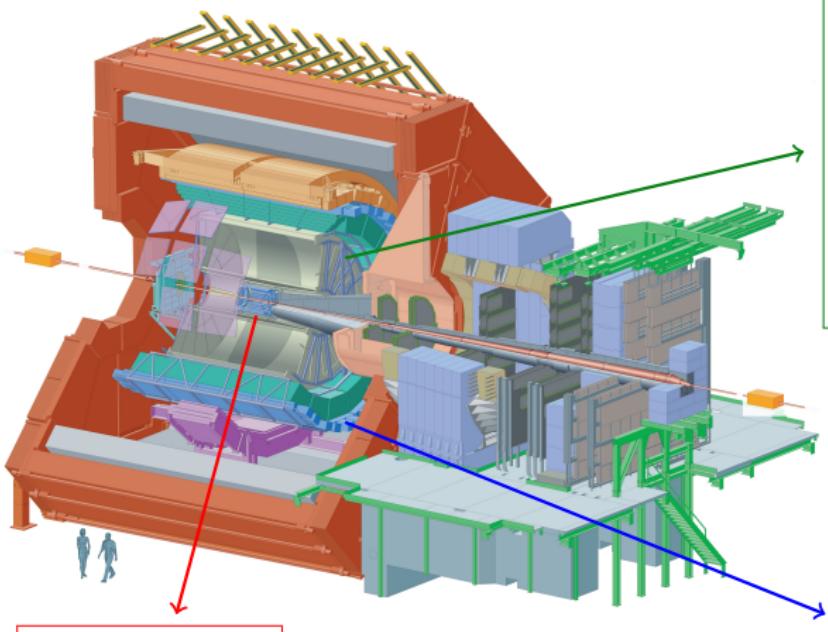
Adroni formati da un quark pesante (*c* o *b*) e uno o più quark leggeri



Si possono distinguere quattro regioni:

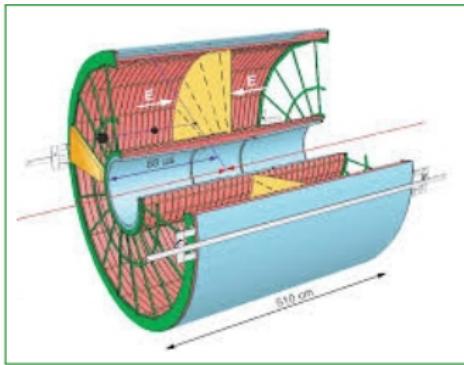
- $x \lesssim 0.1 \rightarrow$ shadowing region
- $0.1 \lesssim x \lesssim 0.2 \rightarrow$ anti-shadowing region
- $0.2 \lesssim x \lesssim 0.8 \rightarrow$ EMC effect
- $x \gtrsim 0.8 \rightarrow$ moto di Fermi

A Large Ion Collider Experiment

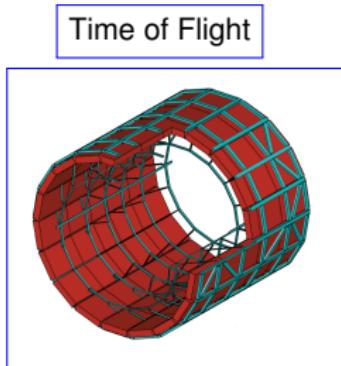


Inner Tracking System

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



Time Projection Chamber



Time of Flight

Campione di dati

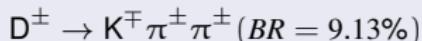
L'analisi è stata svolta su un campione di dati acquisiti in collisioni p-Pb a $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV dalla Collaborazione ALICE
⇒ ~ 100 milioni di eventi *Minimum Bias*

Outline:

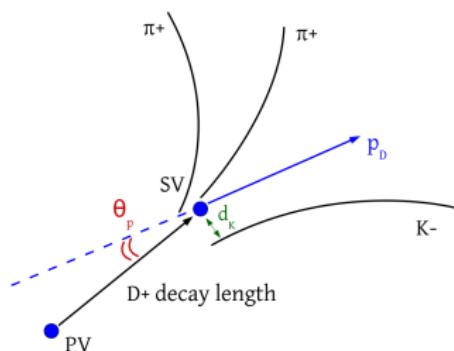
- ① Strategia per la ricostruzione dei mesoni D⁺
- ② Metodo del fit del parametro di impatto
- ③ Metodo della variazione dei tagli
- ④ Misura della produzione dei mesoni D⁺ con pacchetto di ricostruzione di vertici di decadimento basato sul filtro di Kalman

Ricostruzione e selezione di mesoni D⁺ in ALICE

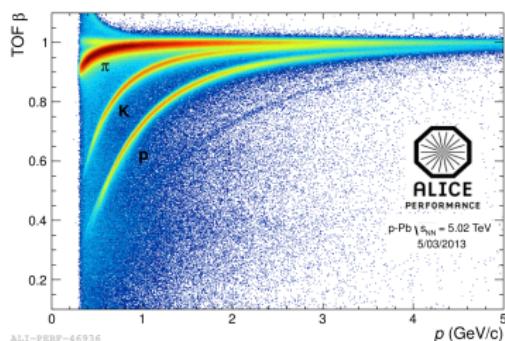
Meson D⁺ ($c\tau = 312 \mu\text{m}$) e coniugati di carica sono ricostruiti nel canale di decadimento adronico



- I candidati mesoni D⁺ vengono ricostruiti combinando tre tracce cariche
- Vengono applicate selezioni sulla qualità delle tracce ricostruite di K[±] e π[±] e su quantità legate alla topologia del decadimento per ridurre il fondo combinatoriale



- Il segnale è estratto con un'analisi di massa invariante



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

Mesoni D⁺ primari e secondari

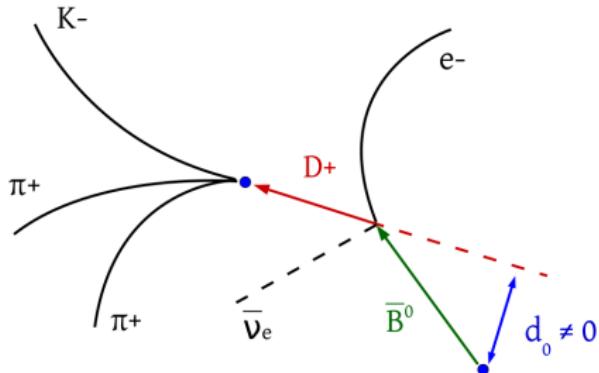
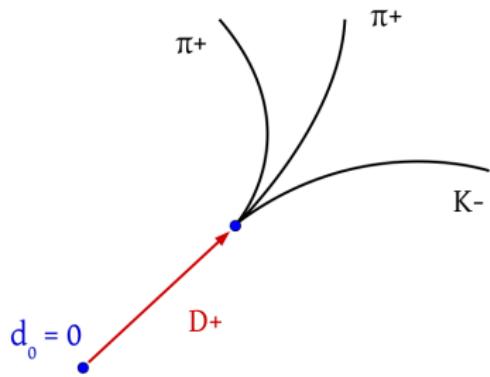
Per la misura dei mesoni D⁺ che sono originati da un quark *charm* prodotto nella collisione è necessario separare il contributo di D⁺ prompt dal segnale totale

D⁺ primari (*prompt*)

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

D⁺ 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⁺ prompt

La frazione di D⁺ 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

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

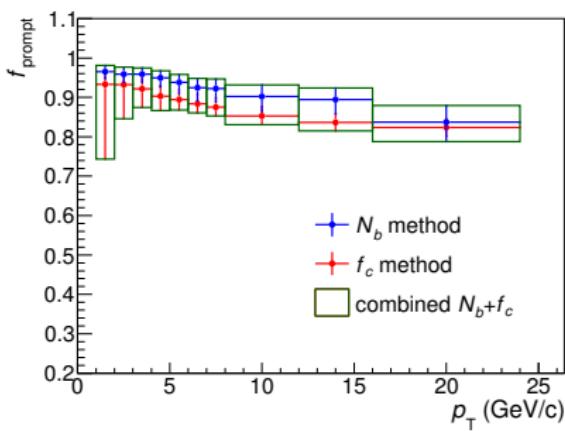
Principali sorgenti di errore sistematico:

- 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

Nuclear modification factor

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

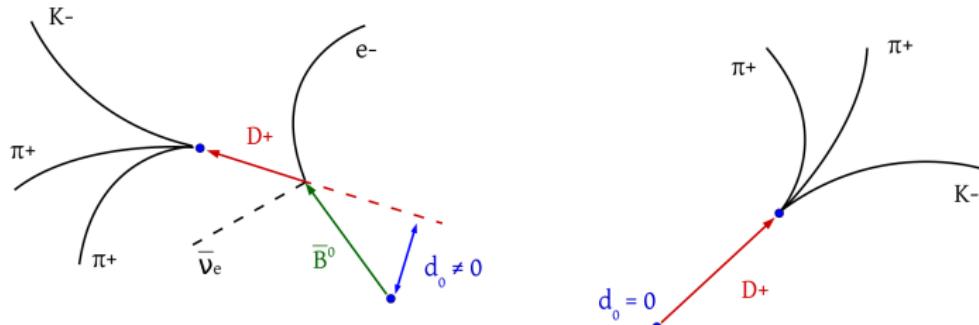


Metodo di fit del parametro di impatto

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

Parametro di impatto (d_0)

Minima distanza tra il vertice primario e il prolungamento della traccia del mesone D^+

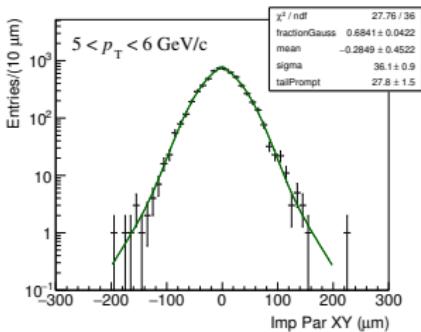


1 Determinazione dei *template* (fase di *prefit*)

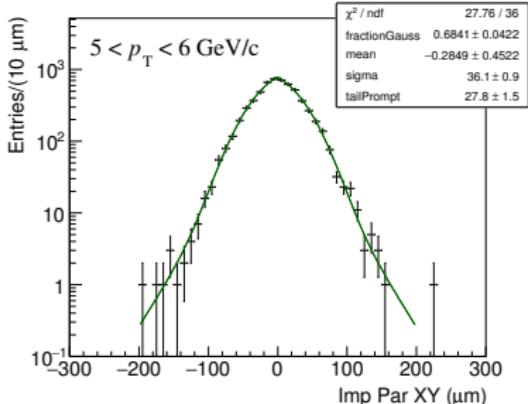
- Fit delle distribuzioni simulate di mesoni D^+ prompt
- Fit delle distribuzioni simulate di mesoni D^+ feed-down
- Fit delle distribuzioni del fondo combinatoriale ottenute dai dati nelle regioni di massa invariante a lato del picco (*side-bands*)

2 Fit unbinned dei dati

La funzione di fit finale è somma dei singoli contributi

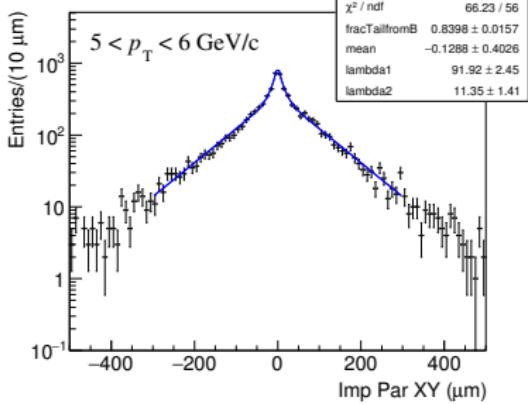


Fit delle distribuzioni simulate di D^+ prompt e feed-down



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

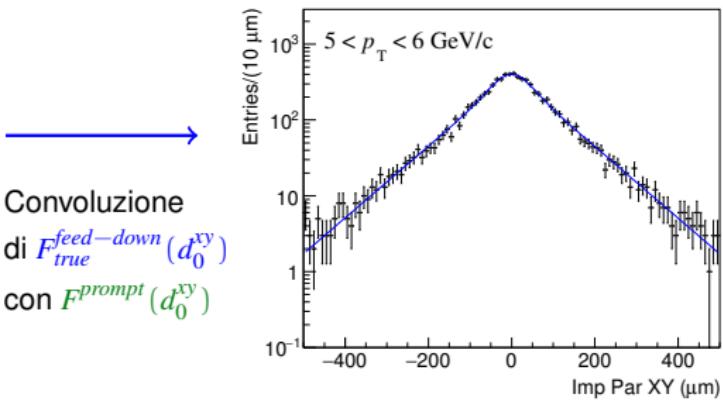
→ somma di una Gaussiana e una funzione esponenziale simmetrica rispetto al valor medio



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

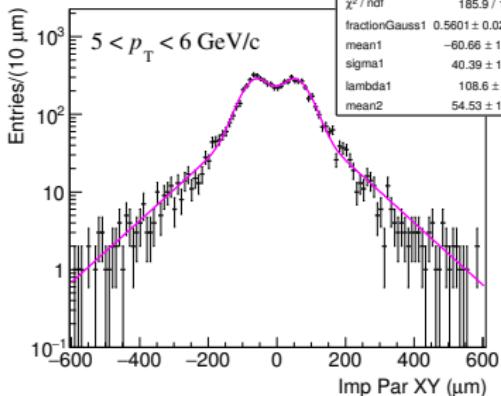
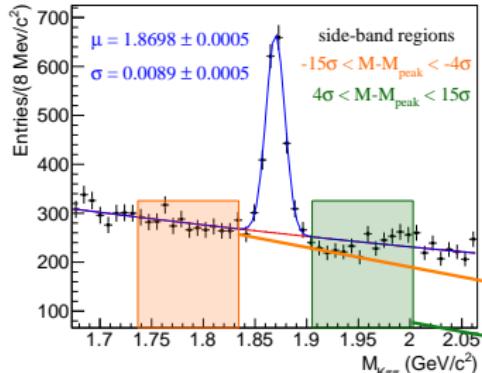
→ somma di due funzioni esponenziali simmetriche rispetto al valor medio

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



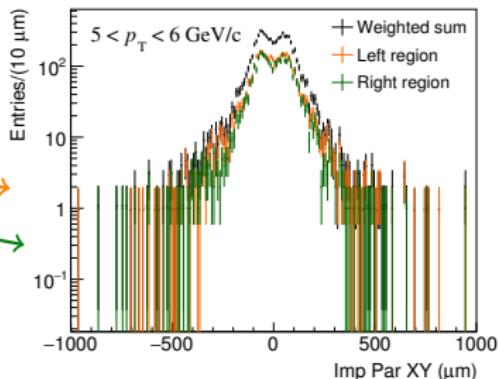
Fit delle distribuzioni del fondo combinatoriale

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



Fondo combinatoriale

Fondo costituito dalla combinazione di tracce scorrelate, non derivanti dal decadimento di mesoni D⁺



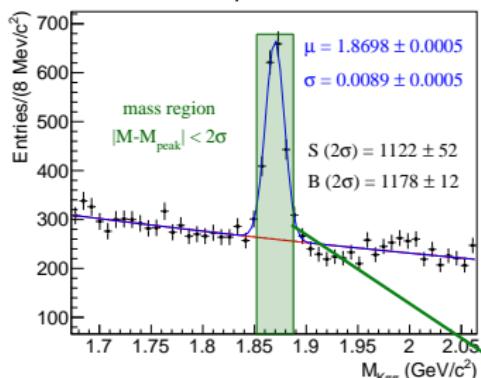
Fondo combinatoriale: fit della distribuzione del parametro di impatto ottenuta dalle regioni di massa invariante a lato del picco (*side-bands*)

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

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

Fit unbinned dei dati

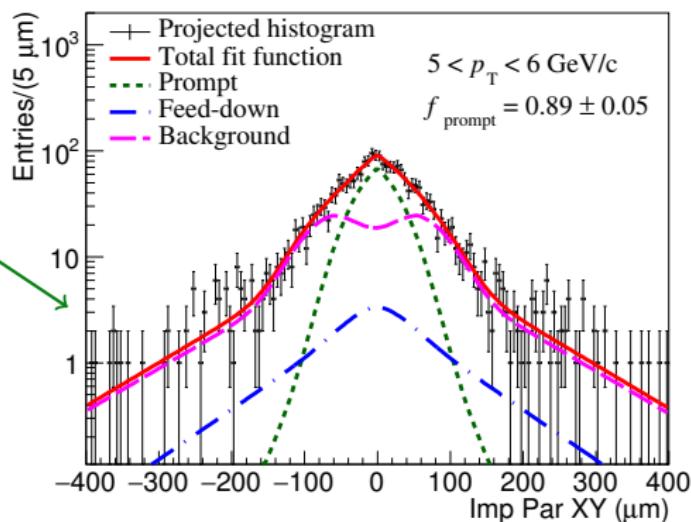
$5 < p_T < 6 \text{ GeV}/c$



- Parametri liberi: f_{prompt} , σ_{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:

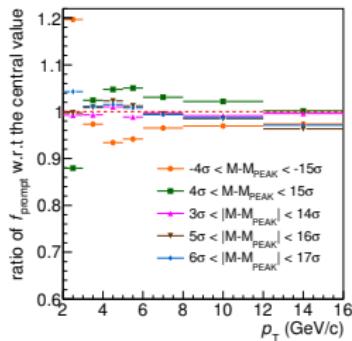
1 Imperfetta descrizione delle distribuzioni

- 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

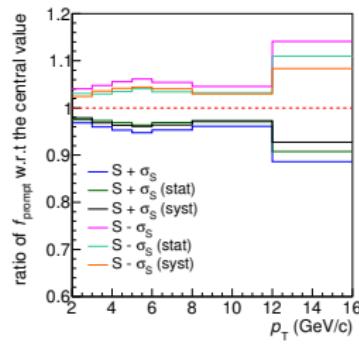
2 Incertezza sulla valore del segnale S

3 Consistenza e stabilità del procedimento

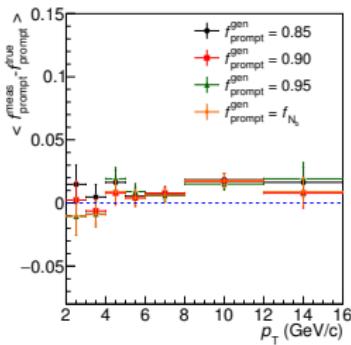
1 Variazione del range di massa invariante per la parametrizzazione del fondo



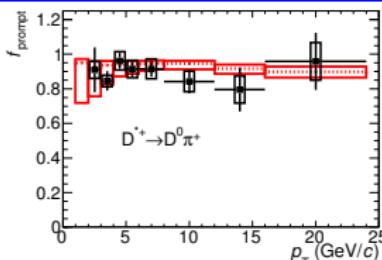
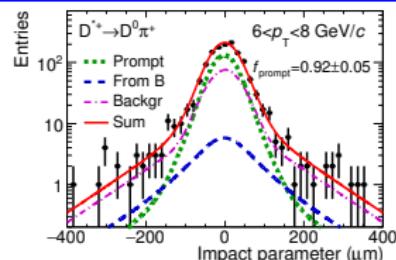
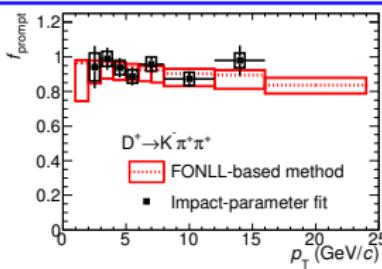
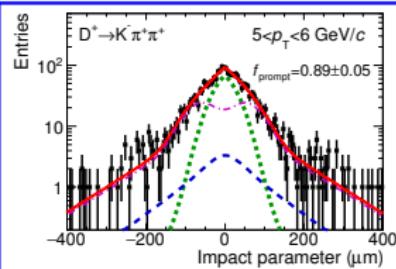
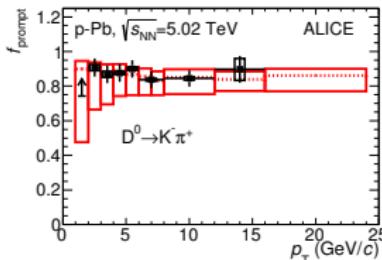
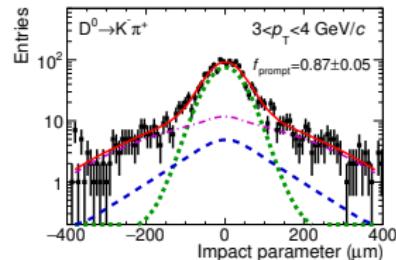
2 Variazione della quantità di segnale S nel fit tra $S - \sigma_S$ e $S + \sigma_S$



3 Test Monte Carlo per valutare la bontà del procedimento

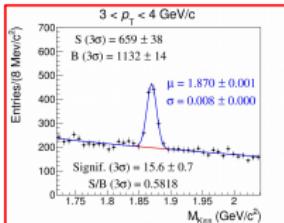
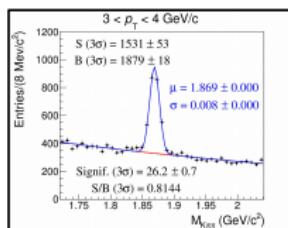


Metodo di fit del parametro di impatto - Risultato

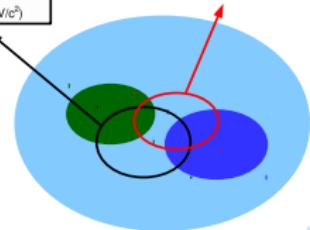


- La frazione di D^+ prompt misurata con il metodo del fit del parametro di impatto è compatibile con i metodi *theory-driven*
- L'incertezza totale è compatibile con i metodi *theory-driven* a p_T intermedio e maggiore ad alto e basso p_T
- Risultato inserito come cross-check dei metodi *theory-driven* 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



- 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

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

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

Applicando selezioni su quantità topologiche per ottenere un buon rapporto segnale su fondo e una buona significatività statistica

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

se ne seleziona soltanto una parte

- **Raw yield Y :** numero grezzo di D⁺ estratto dal fit di massa invariante
- **Efficienza ϵ_X :** rapporto tra numero di D⁺ prompt (feed-down) ricostruite e generate
- **Corrected yield N_X :** numero di D⁺ prompt (feed-down) corretto per l'efficienza

Metodi di minimizzazione

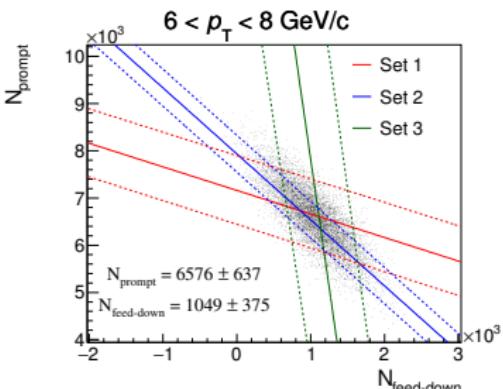
- Minimizzazione analitica

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

Il vettore nullo è sostituito dal vettore dei residui δ

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



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, in cui i parametri delle rette sono estratti da distribuzioni Gaussiane

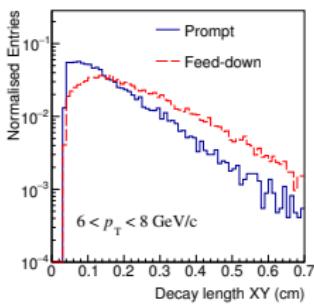
Strategia per la scelta dei set di tagli

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

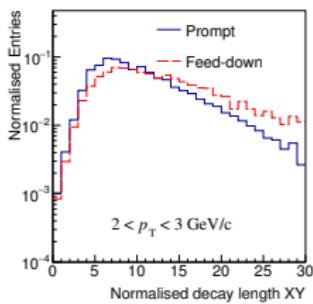
- 1^o set: aumento dell'efficienza di selezione dei mesoni D⁺ prompt
- 2^o set: intermedio (buon estrazione del segnale)
- 3^o set: aumento dell'efficienza di selezione dei mesoni D⁺ feed-down

Variabili topologiche usate per definire i set di tagli:

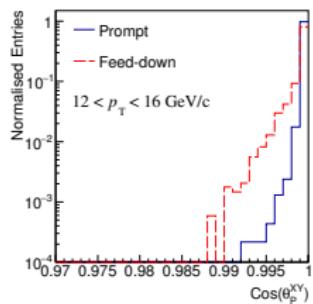
- Lunghezza di decadimento nel piano trasverso



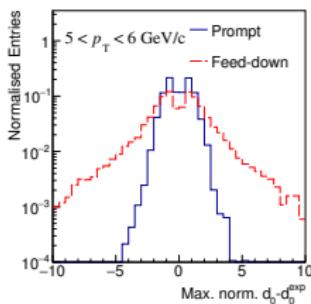
- Lunghezza di decadimento nel piano trasverso normalizzata al proprio errore



- Coseno dell'angolo di pointing nel piano trasverso



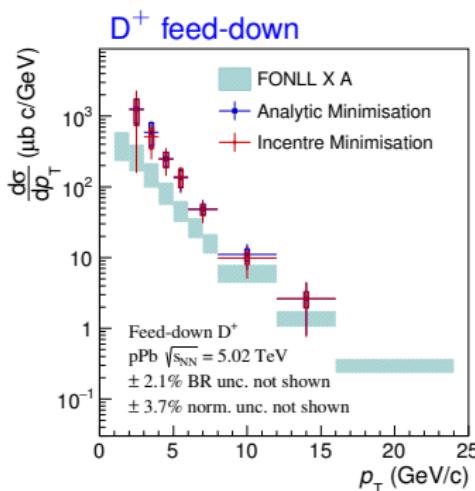
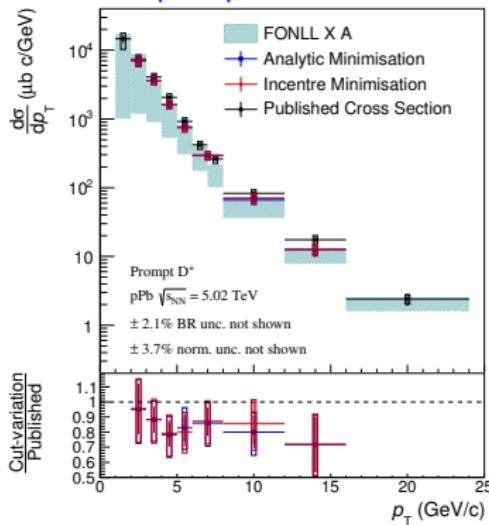
- Massima differenza normalizzata tra il parametro di impatto atteso e misurato delle tracce figlie



Metodo della variazione dei tagli

Risultato

D^+ prompt



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

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

Metodo di ricostruzione dei mesoni D⁺ 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:

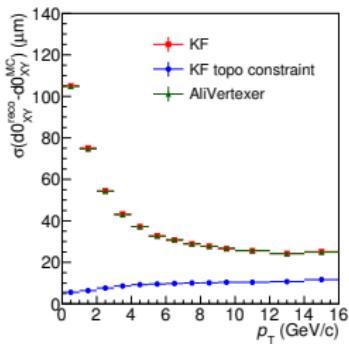
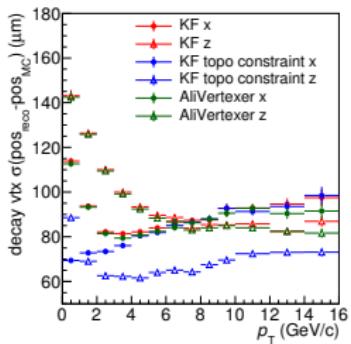
$$\mathbf{r} = (x, y, z, p_x, p_y, p_z, E, s)$$

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⁺ prompt \Rightarrow risoluzione della variabile X:

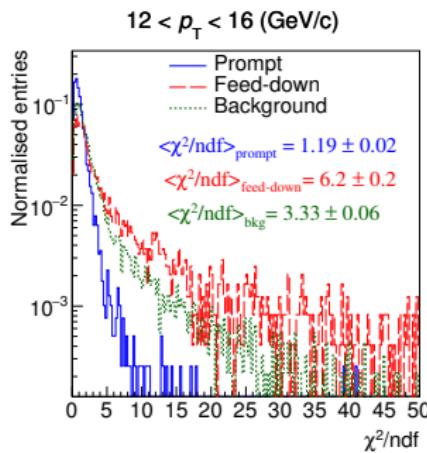
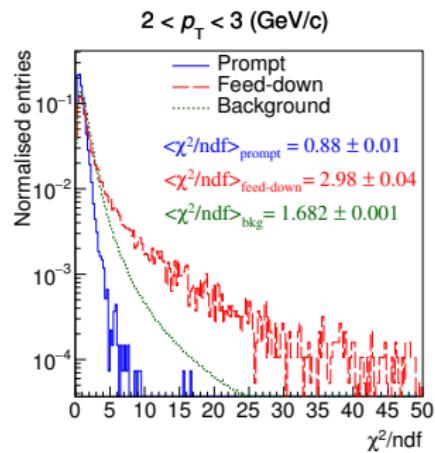
$$Res(p_T) = \sigma(X_{reco} - X_{MC})(p_T)$$



Distribuzioni di χ^2/ndf dopo l'applicazione del *topological constraint*

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

⇒ L'applicazione del **topological constraint** al vertice primario permette di ridurre il contributo di mesoni D⁺ da B, valutando il χ^2 del vettore di stato dei candidati mesoni D⁺

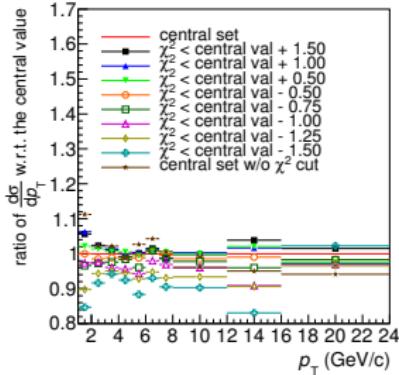
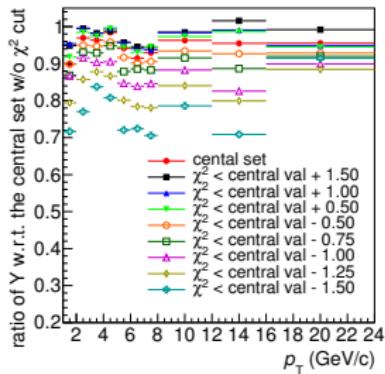
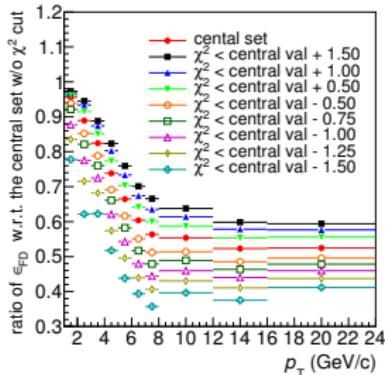
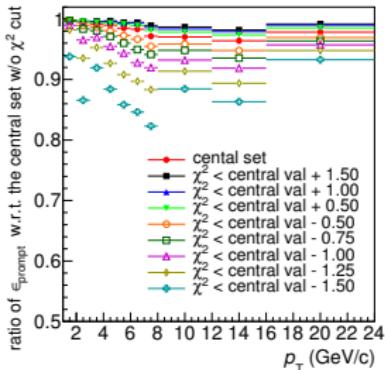


⇒ selezione su χ^2/ndf dei candidati mesoni D⁺, oltre alle selezioni sulle quantità topologiche usate nell'analisi standard

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

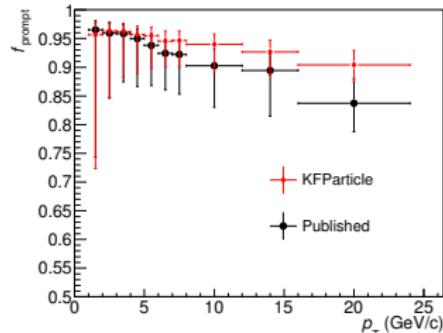
set centrale ottimizzato variando
la selezione tra [-1.5, 1.5]

Studio della variazione della selezione su χ^2/ndf



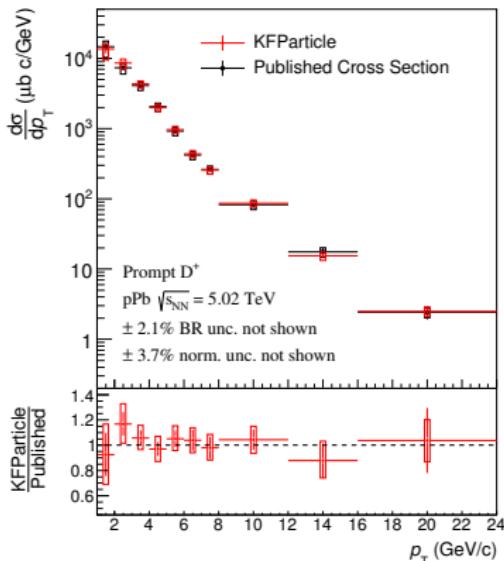
- La riduzione dell'efficienza ottenuta applicando una selezione su χ^2/ndf raggiunge il 20% per i mesoni D^+ **prompt** e il 60% per i mesoni D^+ **feed-down**
- La perdita di segnale non supera il 30%
- Applicando una selezione molto "stretta" su χ^2/ndf si osserva una riduzione sistematica della sezione d'urto differenziale

Metodo di ricostruzione dei mesoni D⁺ con il filtro di Kalman - Risultato

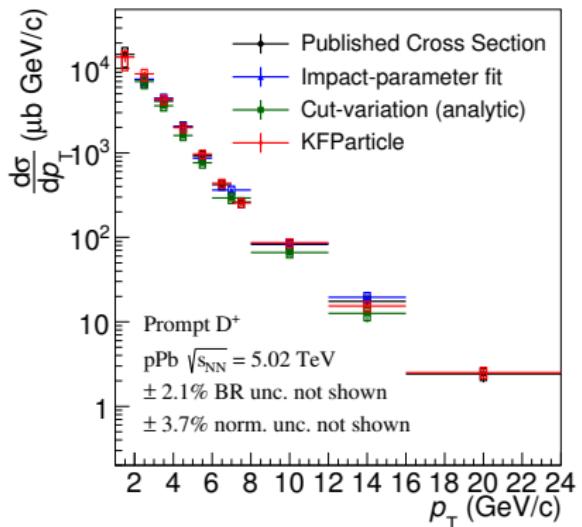


- La frazione di D⁺ prompt è maggiore rispetto a quella ottenuta applicando le selezioni nell'analisi standard
⇒ riduzione dell'errore sistematico
- Sorgenti di errore sistematico valutate:
 - Estrazione del segnale
 - Efficienza di selezione dei tagli topologici
 - Efficienza di selezione della PID
 - Imperfetta descrizione delle distribuzioni di p_T di mesoni D⁺ e B generati nella simulazione MC
 - Determinazione della frazione di D⁺ prompt con i metodi *theory-driven*
- Sezione d'urto differenziale in p_T di produzione dei mesoni D⁺ prompt ottenuta compatibile con il risultato pubblicato

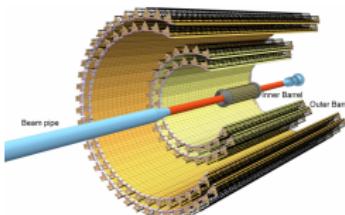
$$\left. \frac{d\sigma_{prompt}^{D^+}}{dp_T} \right|_{|y| < 0.5} = \frac{1}{2} \cdot \frac{f_{prompt} \cdot N_{raw}^{D^\pm} |_{|y| < y_{fid}}}{\Delta p_T \Delta y \cdot (Acc \times \epsilon)_{prompt}} \cdot \frac{L_{int}}{BR}$$



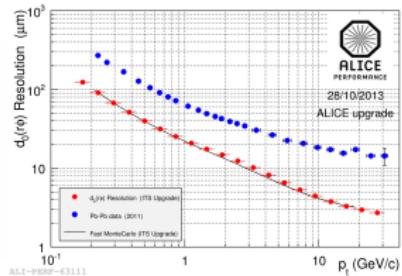
Conclusioni e confronto



- Il metodo basato sulla ricostruzione dei mesoni D^+ con il pacchetto KFParticle e l'applicazione del topological constraint permette di ridurre significativamente il contributo di D^+ feed-down

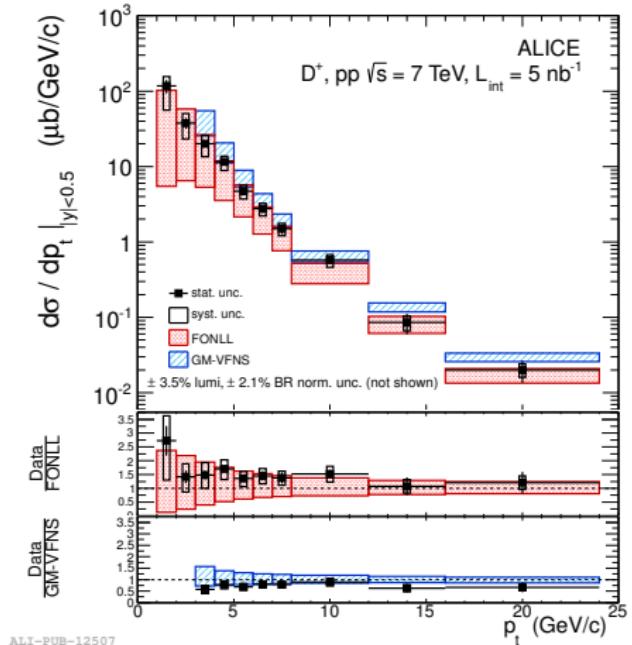


- Tutti i risultati ottenuti sono compatibili con la sezione d'urto differenziale in p_T di produzione dei mesoni D^+ prompt all'interno dell'incertezza sperimentale
 - I metodi del fit del parametro di impatto e della variazione dei tagli permettono di effettuare la misura della produzione di mesoni D^+ prompt senza l'utilizzo di calcoli di QCD perturbativa
- al momento limitati dalla statistica disponibile
- miglioramento previsto a partire dal Run2 e soprattutto per il Run3 ⇒ Upgrade di ALICE

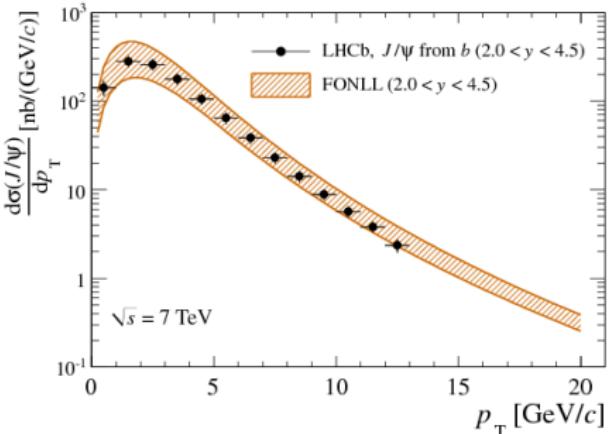


BACKUP

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

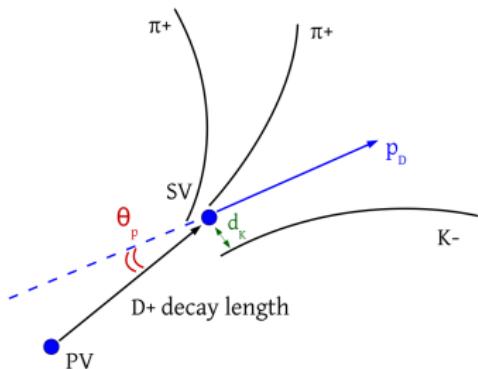
Set di tagli nell'analisi standard

L_{xy} normalizzata

$$\text{Norm. } L_{xy} = L_{xy} / \sigma_{L_{xy}}$$

Sigma vertex

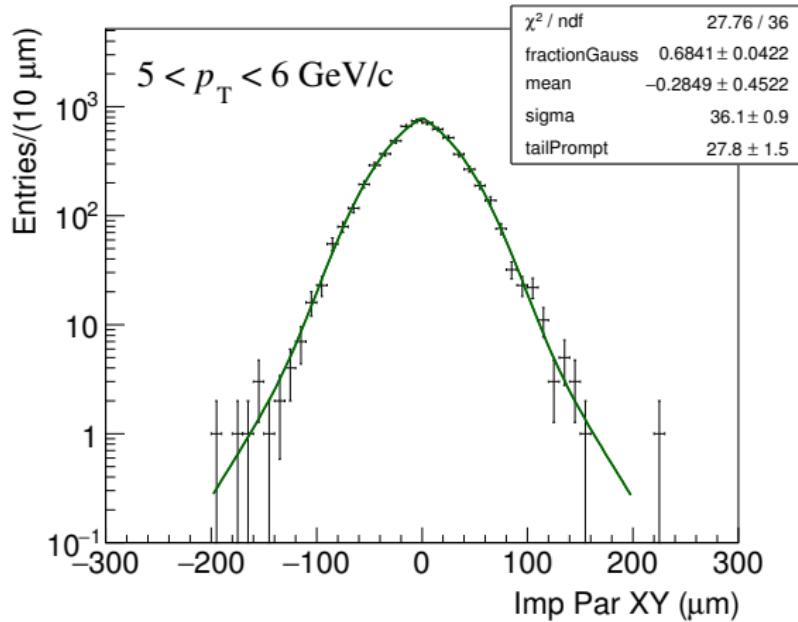
$$\sigma_{vertex} = \sqrt{d_K^2 + d_{\pi_1}^2 + d_{\pi_2}^2}$$



p_T (GeV/c)	[1,2]	[2,8]	[8,9]	[9,10]	[10,11]	[11,12]	[12,14]	[14,16]	[16,24]
p_T^K (GeV/c) >	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
p_T^π (GeV/c) >	0.3	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Decay length (cm) >	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.10	0.10	0.15
Norm. L_{xy} >	9	8	8	8	8	6	6	9	5
$\cos(\theta_P)$ >	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990
$\cos(\theta_P^{xy})$ >	0.995	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990
σ_{vertex} (cm) <	0.030	0.030	0.035	0.035	0.035	0.070	0.070	0.090	0.030

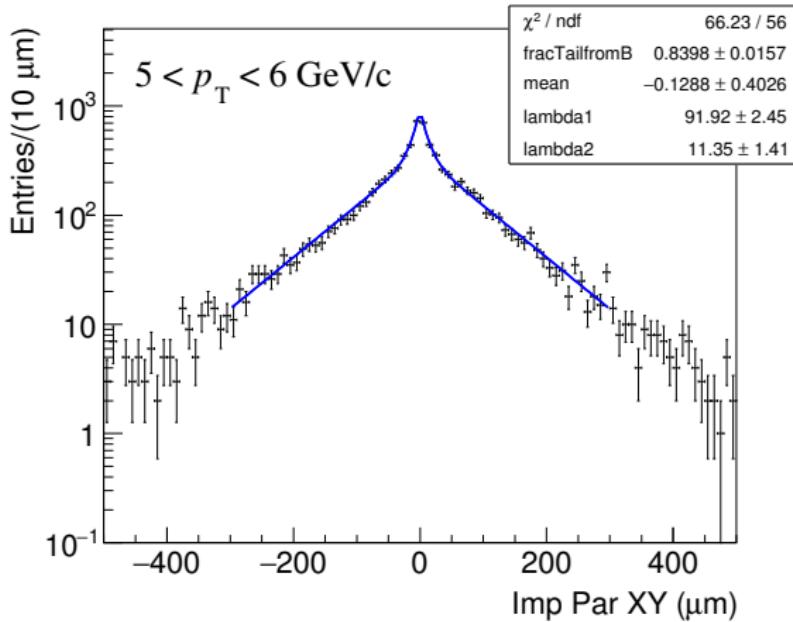
Fit del parametro di impatto - template D⁺ prompt

$$F^{prompt}(d_0^{xy}) = N \cdot \left\{ \frac{f_{gaus}^{prompt}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{prompt}} e^{-\frac{(d_0^{xy}-\mu_{prompt})^2}{2\sigma_{prompt}^2}} + \frac{1-f_{gaus}^{prompt}}{2\lambda_{prompt}} e^{-\frac{|d_0^{xy}-\mu_{prompt}|}{\lambda_{prompt}}} \right\}$$



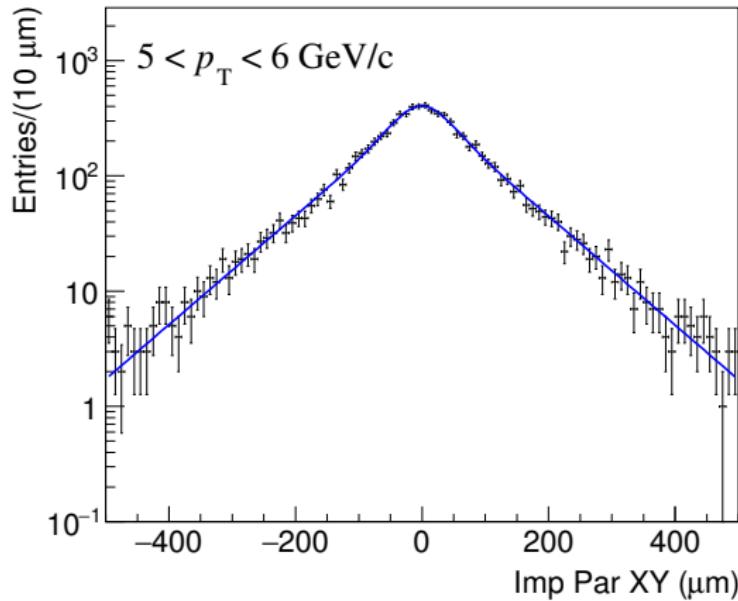
Fit del parametro di impatto - template D⁺ feed-down (true)

$$F_{true}^{feed-down}(d_0^{xy}) = N \cdot \left\{ \frac{f_{\lambda_1}^{FD}}{2\lambda_1^{FD}} e^{-\frac{|d_0^{xy} - \mu_{FD}|}{\lambda_1^{FD}}} + \frac{1-f_{\lambda_1}^{FD}}{2\lambda_2^{FD}} e^{-\frac{|d_0^{xy} - \mu_{FD}|}{\lambda_2^{FD}}} \right\}$$



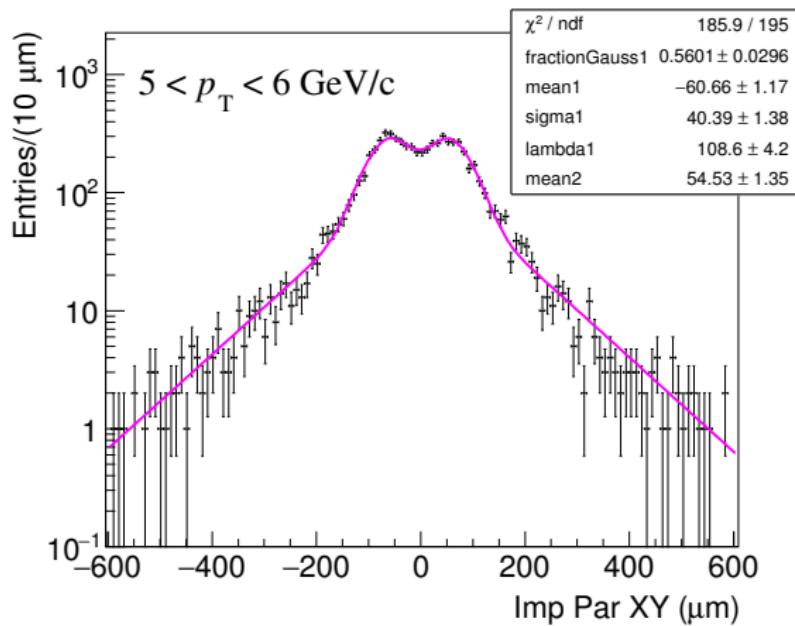
Fit del parametro di impatto - template D⁺ feed-down (reco)

$$F_{reco}^{feed-down}(d_0^{xy}) = N \cdot \int_{d_0^{xy, min}}^{d_0^{xy, max}} F_{true}^{feed-down}(d_0^{xy'}) F^{prompt}(d_0^{xy} - d_0^{xy'}) dd_0^{xy'}$$



Fit del parametro di impatto - template fondo combinatoriale

$$F^{bkg}(d_0^{xy}) = N \cdot \left\{ F_1^{gaus+exp}(d_0^{xy}; f_{gaus}^{bkg}, \mu_1^{bkg}, \sigma_{bkg}, \lambda_{bkg}) + F_2^{gaus+exp}(d_0^{xy}; f_{gaus}^{bkg}, \mu_2^{bkg}, \sigma_{bkg}, \lambda_{bkg}) \right\}$$



Fit unbinned

La tecnica scelta per effettuare il fit sulla distribuzione del parametro di impatto dei dati è il *fit unbinned*

Fit unbinned

$$\ln L(\vec{\theta}, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \ln f(x_i, \vec{\theta})$$

$N \rightarrow$ numero totale di misure
 $f(x_i, \vec{\theta}) \rightarrow$ densità di probabilità di x_i

Fit binned

$$\ln L(\vec{\theta}) = \sum_{i=1}^{N_{bins}} n_i \ln v_i(\vec{\theta})$$

$N_{bins} \rightarrow$ numero di bin dell'istogramma
 $n_i \rightarrow$ numero di entrate nel bin i -esimo

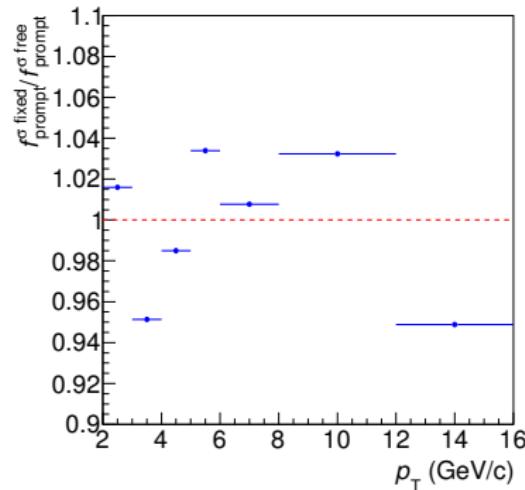
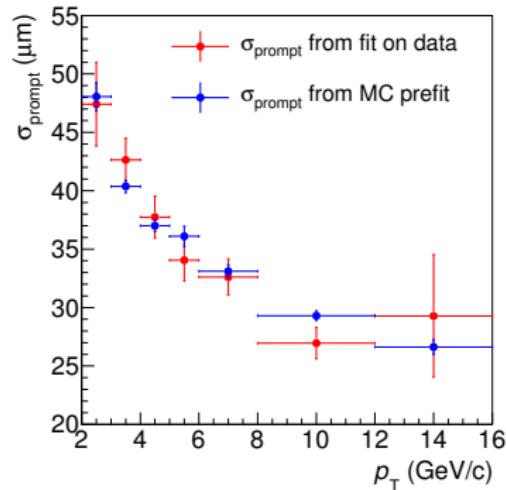
$$v_i(\vec{\theta}) = N \int_{x_i^{\min}}^{x_i^{\max}} f(x, \vec{\theta}) dx$$

Il *fit unbinned* permette di eliminare l'incertezza dovuta alla dimensione finita delle celle di un istogramma e di avere una migliore precisione nelle regioni in cui si hanno pochi conteggi

⇒ il fit non è perciò eseguito su un istogramma, ma su un *tree*, in cui i dati sono immagazzinati senza essere messi in bin, e che quindi permette di utilizzare il *fit unbinned*

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

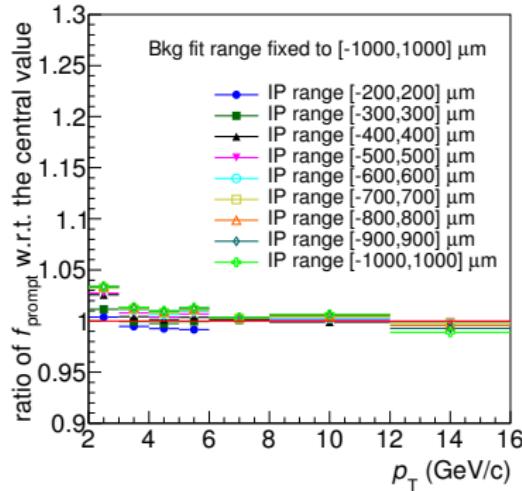
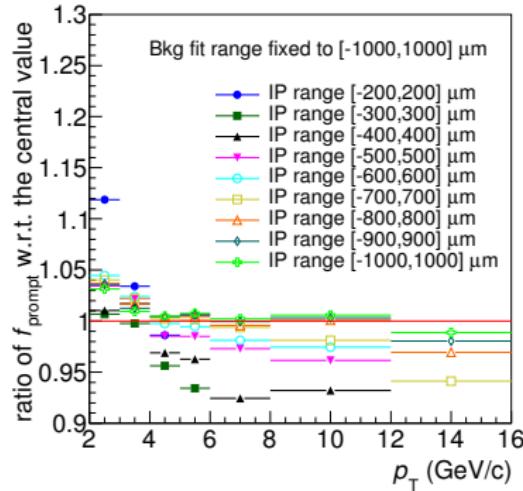
Parametro di risoluzione σ_{prompt} fissato



p_T (GeV/c)	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
σ_{prompt}	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

Variazione del range dei fit

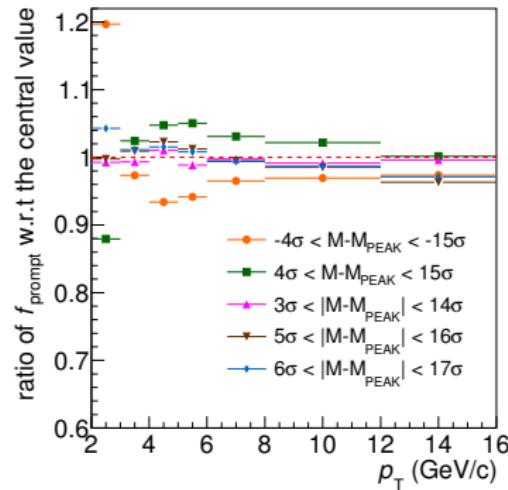
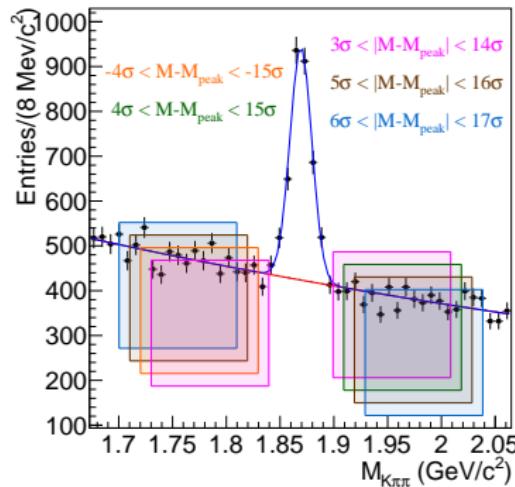


p_T (GeV/c)	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
fit range	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

Variazione della regione di massa invariante delle side-bands

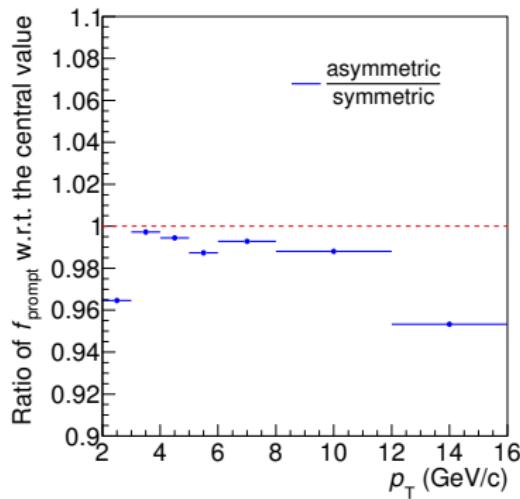
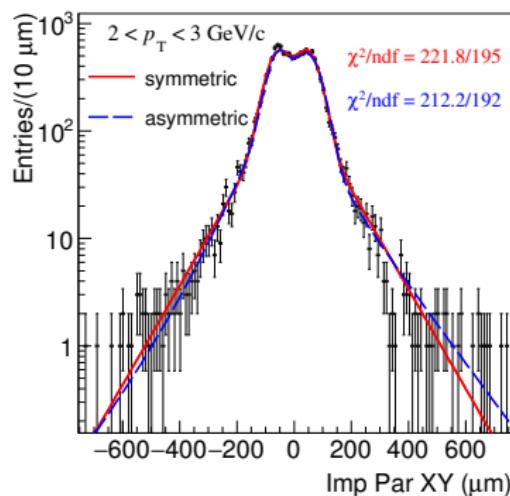
$4 < p_T < 5 \text{ GeV}/c$



$p_T \text{ (GeV}/c)$	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
side-bands	6%	3%	3%	3%	3%	3%	3%

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

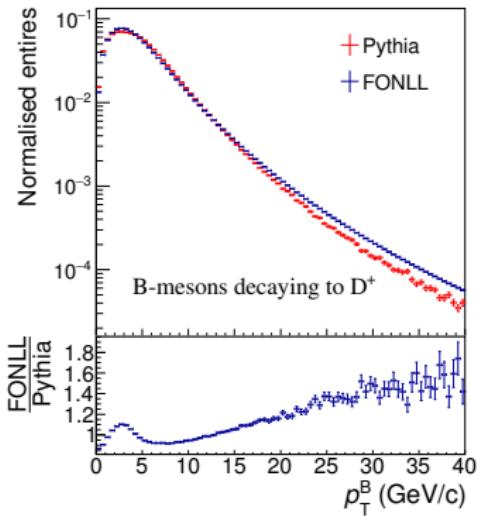
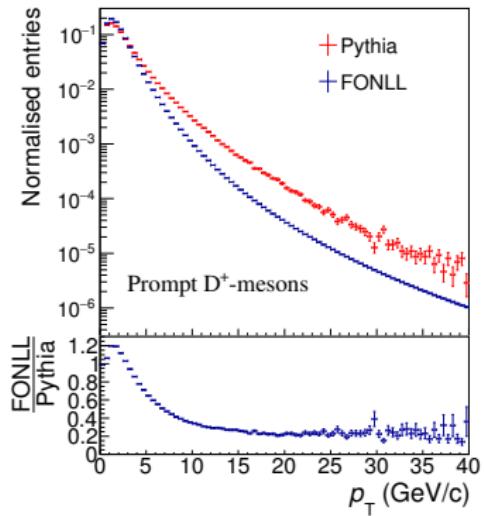
Variazione della funzione di fit per il fondo



p_{T} (GeV/c)	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
funzione fit fondo	4%	1%	1%	1%	1%	1%	1%

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

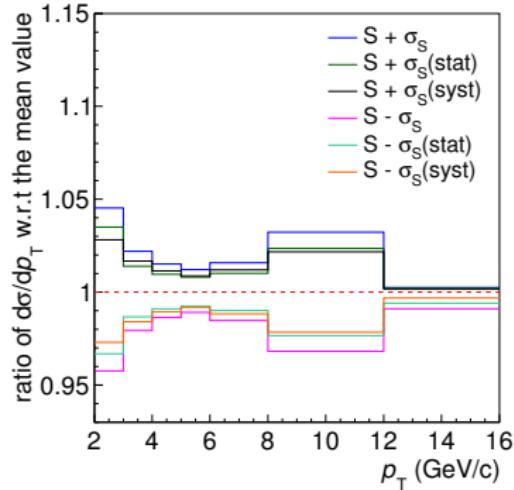
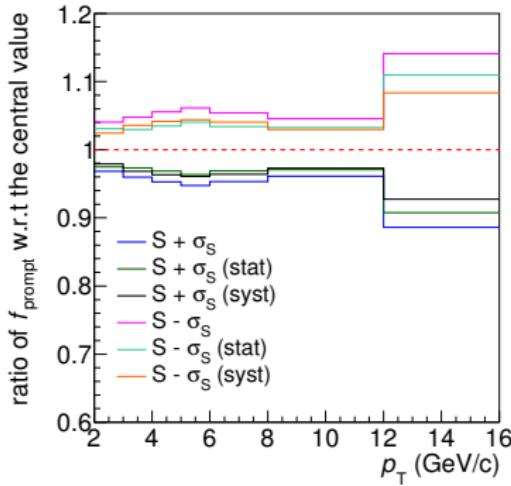
Forma degli spettri in p_T di mesoni D⁺ e B generati



p_T (GeV/c)	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
distribuzioni p_T	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

Variazione della quantità di segnale S nel fit

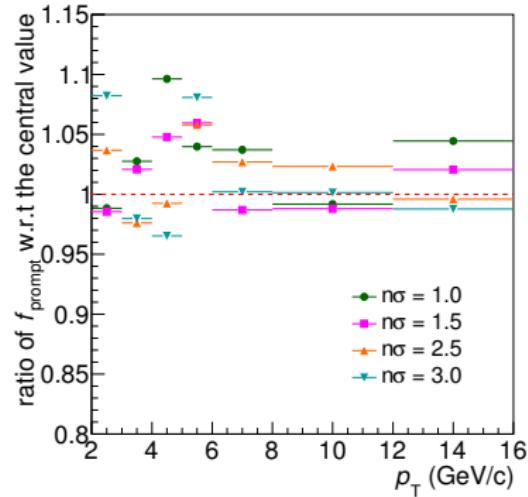
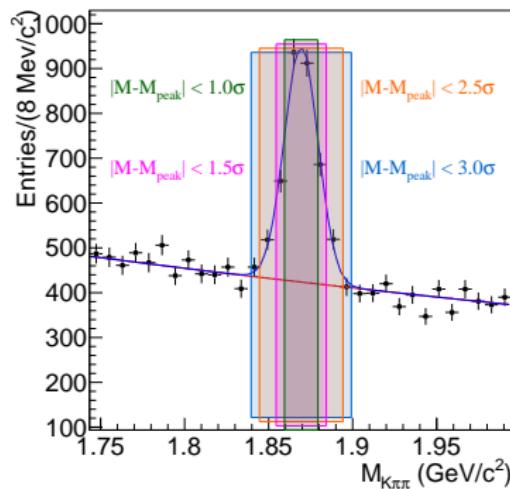


p_T (GeV/c)	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
parametro S	4%	2%	2%	2%	2%	2%	2%

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

Variazione della finestra di massa invariante

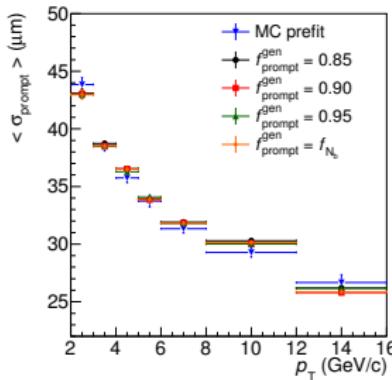
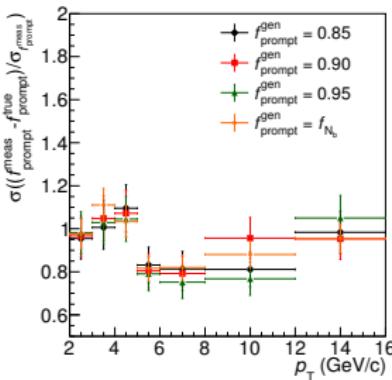
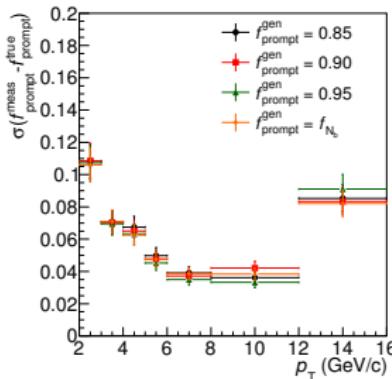
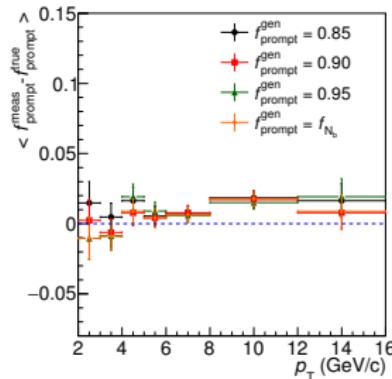
$4 < p_T < 5 \text{ GeV}/c$



p_T (GeV/c)	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 8]	[8, 12]	[12, 16]
range di massa	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.

Fit del parametro di impatto - Errori sistematici

Monte Carlo closure test



- Distribuzioni del parametro di impatto simulate a partire dalle distribuzioni usate nella fase di prefit
- Quattro diversi valori di f_{prompt} utilizzati in input
- Quantità di segnale e fondo uguali ai dati
- Generazione e fit delle distribuzioni ripetuti 50 volte

Minimizzazione Analitica I

Esprimendo il sistema di equazioni in notazione matriciale otteniamo

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1^{prompt} & \epsilon_1^{feed-down} \\ \epsilon_2^{prompt} & \epsilon_2^{feed-down} \\ .. & .. \\ \epsilon_n^{prompt} & \epsilon_n^{feed-down} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_{prompt} \\ N_{feed-down} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ .. \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ .. \\ 0 \end{pmatrix}$$

Sostituendo il vettore nullo con un **vettore dei residui δ**

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

Per ottenere una soluzione approssimata è quindi necessario minimizzare il vettore dei residui

Minimizzazione Analitica II

- Il chi quadro è definito come $\chi^2 = \boldsymbol{\delta}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\delta}$, dove \mathbf{C} è la matrice delle covarianze

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

Le σ_{δ_i} sono valutate iterativamente

- nel primo step solo gli errori sui *raw yield* sono considerati (N_{prompt} e N_{FD} non sono conosciuti)
- dal secondo step vengono utilizzati nella propagazione dell'errore N_{prompt} e N_{FD} ottenuti dallo step precedente

$$\sigma_{\delta_i}^2 = \sigma_{Y^i}^2 + \sigma_{\epsilon_{prompt}^i}^2 N_{prompt}^2 + \sigma_{\epsilon_{FD}^i}^2 N_{FD}^2$$

- Il numero di D^+ prompt e feed-down è infine valutato minimizzando il χ^2 ($\frac{d\chi^2}{dN_i} = 0$)

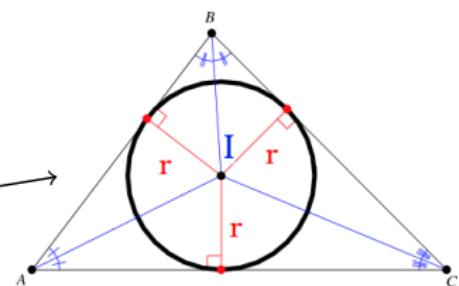
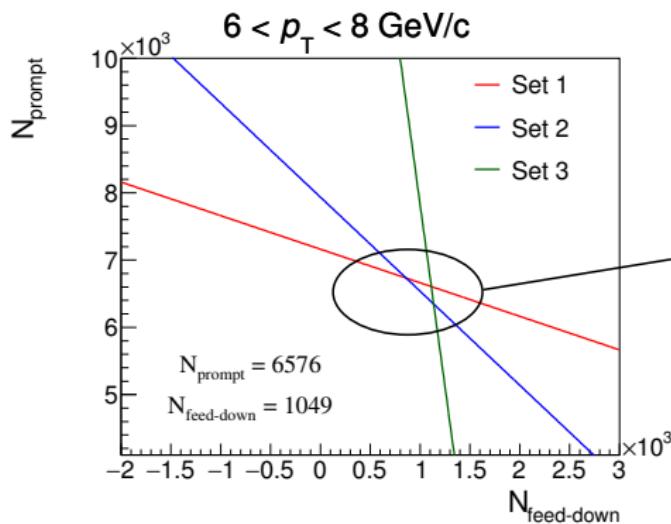
$$\mathbf{N} = (\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\epsilon})^{-1} (\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{Y}) \quad \mathbf{Cov}(\mathbf{N}) = (\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\epsilon})$$

Determinazione dell'incentro I

Ogni equazione del sistema è descritta una retta nel piano $(N_{prompt}, N_{feed-down})$

$$N_{prompt} = -\frac{\epsilon_i^{feed-down}}{\epsilon_i^{prompt}} \cdot N_{feed-down} + \frac{Y_i}{\epsilon_i^{prompt}}$$

Idealmente c'è soltanto un punto di intersezione tra le rette, ma l'errore sull'estrazione del segnale e sulla determinazione dell'efficienza fa sì che ci siano n intersezioni

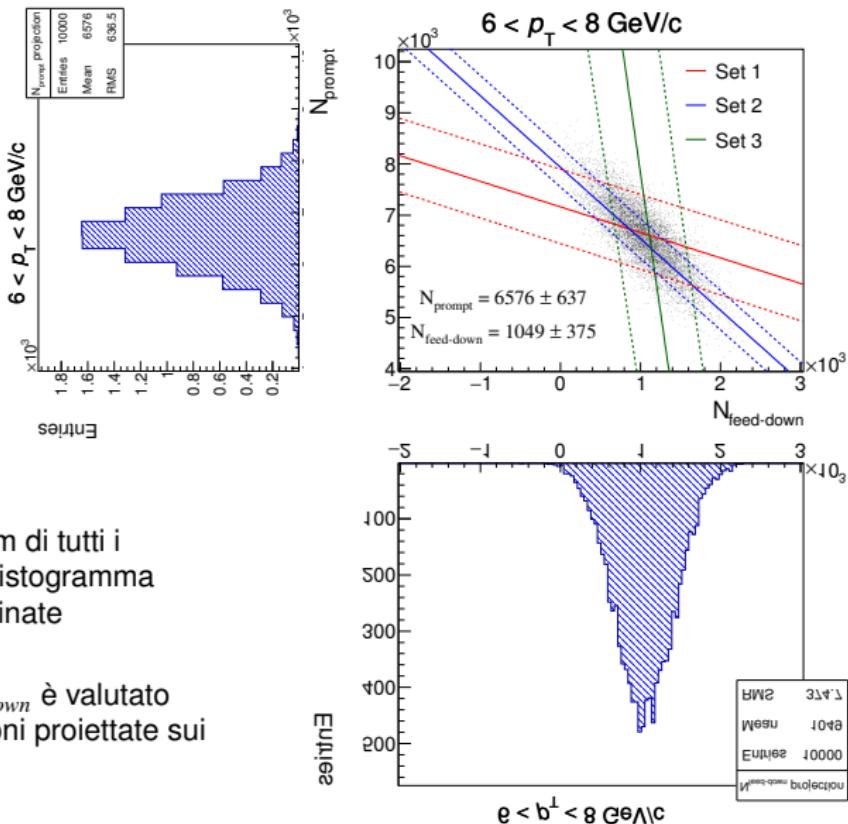


INCENTRO (I):
punto di intersezione delle bisettrici

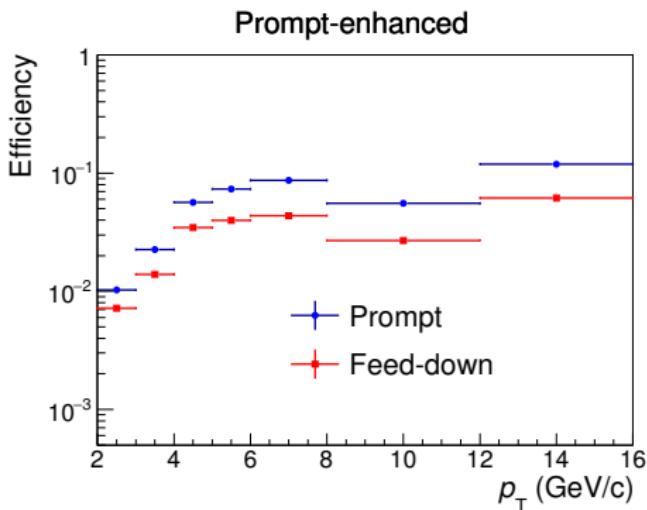
Errore sulla determinazione dell'incentro

L'errore è stato valutato con una **simulazione MC**:

- i parametri vengono generati da una distribuzione gaussiana con valor medio il valore del parametro considerato e deviazione standard il suo errore
- per ogni generazione random di tutti i parametri viene riempito un istogramma bidimensionale con le coordinate dell'incentro calcolato
- l'errore su N_{prompt} ed $N_{feed-down}$ è valutato come l'RMS delle distribuzioni proiettate sui rispettivi assi

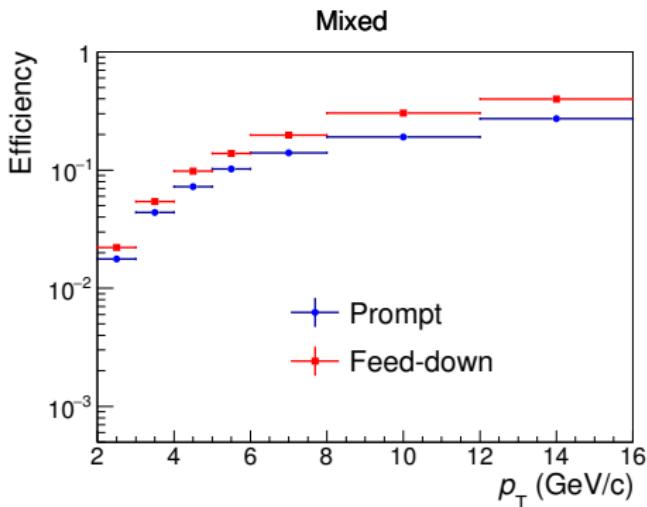


Metodo della variazione dei tagli - Efficienze set 1



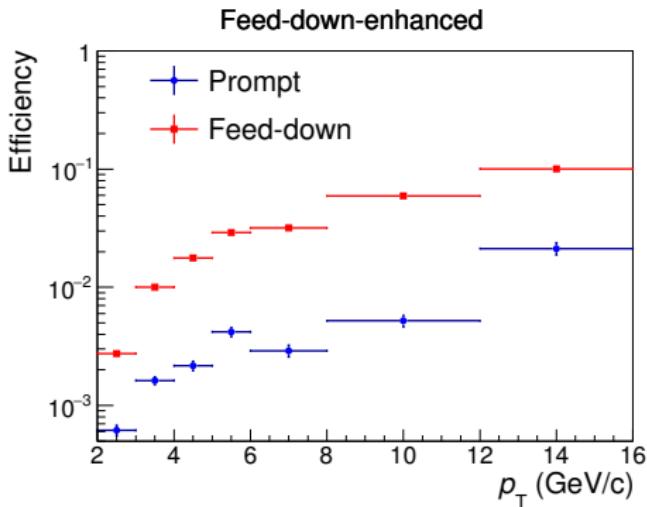
p_T (GeV/c)	[2,4]	[4,6]	[6,8]	[8,12]	[12,16]
L_{xy} (cm)	[0.02, 0.14]	[0.02, 0.15]	[0.02, 0.15]	[0.04, 0.15]	[0.04, 0.25]
Norm. L_{xy}	[7, 14]	[4, 16]	[4, 16]	[4, 16]	[4, 22]
$Cos(\theta_P^{xy})$	>0.998	>0.998	>0.998	>0.998	>0.998
$max n\sigma_{res}$	[-1.5, 1.5]	[-1.5, 1.5]	[-1.5, 1.5]	[-1.5, 1.5]	[-2.0, 2.0]

Metodo della variazione dei tagli - Efficienze set 2



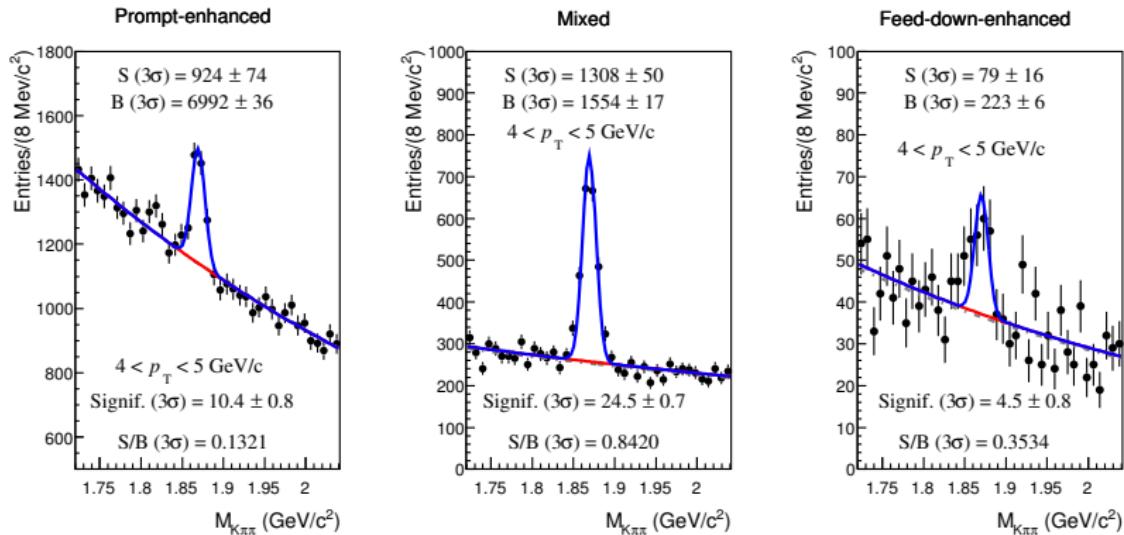
p_T (GeV/c)	[2,4]	[4,6]	[6,8]	[8,12]	[12,16]
L_{xy} (cm)	>0.05	>0.05	>0.05	>0.10	>0.10
Norm. L_{XY}	>9	>9	>9	>6	>6
$\cos(\theta_P^{xy})$	>0.990	>0.990	>0.990	>0.990	>0.990

Metodo della variazione dei tagli - Efficienze set 3



p_T (GeV/c)	[2,4]	[4,6]	[6,8]	[8,12]	[12,16]
L_{xy} (cm)	>0.08	>0.12	>0.20	>0.20	>0.20
Norm. L_{xy}	>9	>12	>20	>20	>20
$Cos(\theta_P^{xy})$	>0.990	>0.990	>0.990	>0.990	>0.990
$max n\sigma_{res}$	<-1.5	<-1.5	<-1.5	<-1.5	<-1.0

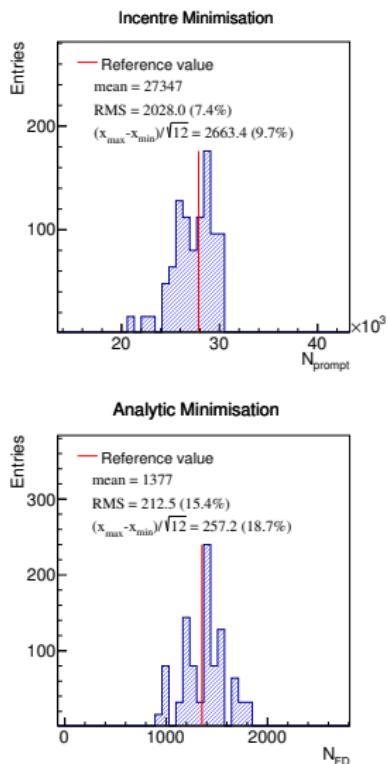
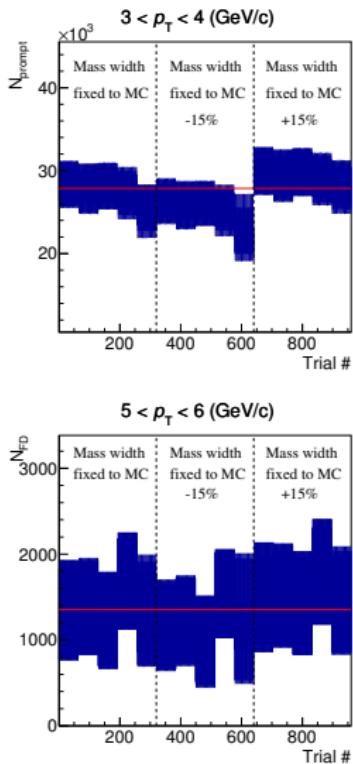
Metodo della variazione dei tagli - Estrazione del segnale



Per il primo e terzo set di tagli la riduzione di uno dei due contributi (feed-down o prompt) determina una significatività più bassa nell'estrazione del segnale ($\text{signif.} \approx 3 - 10$) rispetto al set centrale ($\text{signif.} \approx 15 - 25$)

Metodo della variazione dei tagli - Errori sistematici

Estrazione del segnale

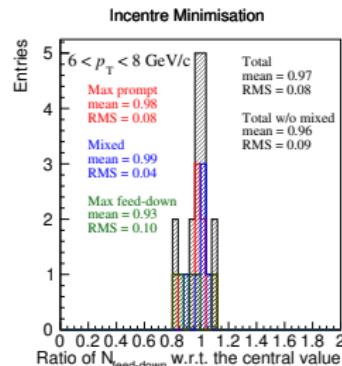
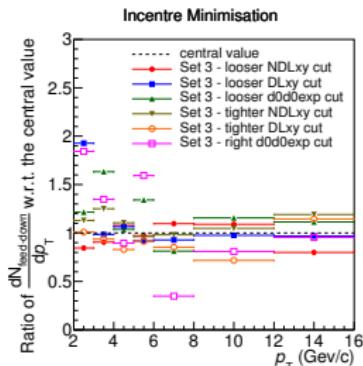
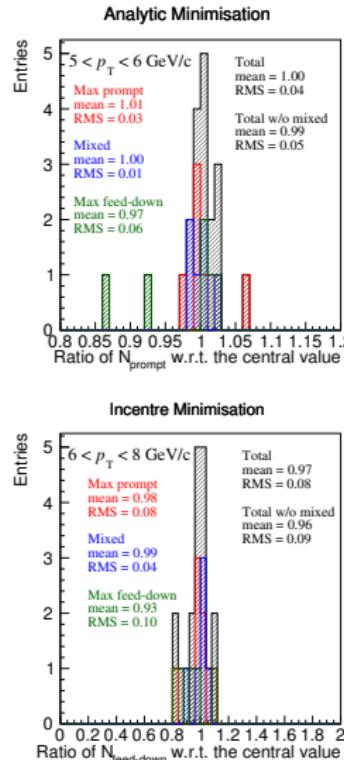
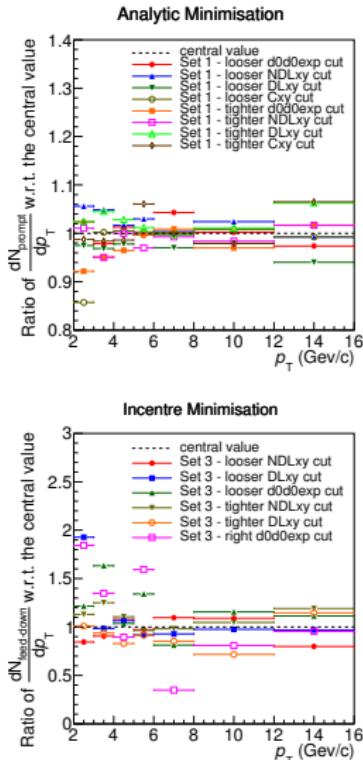


I fit delle distribuzioni di massa invariante sono stati ripetuti applicando tutte le combinazioni delle seguenti configurazioni:

- σ della Gaussiana fissata al valore ottenuto dal fit delle distribuzioni simulate e variando di $\pm 15\%$
- valore medio della Gaussiana fissato al valore ottenuto dal fit delle distribuzioni simulate e lasciato come parametro libero
- 4×4 range di massa invariante diversi
- 5 diverse larghezze dei bin
- Due diverse funzioni per descrivere il fondo (esponenziale e parabolica)

Metodo della variazione dei tagli - Errori sistematici

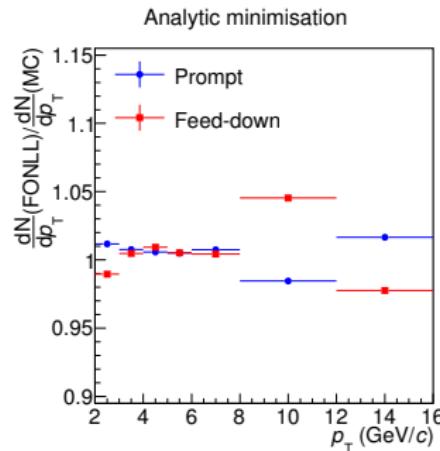
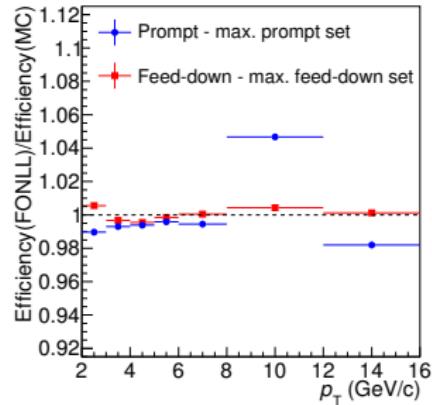
Variazione dei tagli



- La selezione applicata su ogni variabile è stata variata, impostando il valore del taglio più e meno "stretto"
- Le variazioni sono state eseguite indipendentemente per ogni variabile e per ogni set di tagli
- Per valutare l'errore sistematico sulla sezione durto differenziale in p_T di produzione dei mesoni D⁺ *prompt* le variazioni relative al secondo set di tagli non sono state considerate

Metodo della variazione dei tagli - Errori sistematici

Forma degli spettri in p_T di mesoni D⁺ e B generati



- Una differente forma della distribuzione in p_T determina una variazione dell'efficienza, siccome è valutata in intervalli di p_T di dimensione finita
- La maggior variazione si osserva negli intervalli di p_T in cui l'efficienza varia rapidamente e negli intervalli più larghi

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle e topological constraint

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



$$\mathbf{m}_k = H_k \mathbf{r}^t + \boldsymbol{\eta}_k, \text{ dove } \begin{cases} \boldsymbol{\eta}_k \rightarrow \text{errore statistico} \\ V_k = \langle \boldsymbol{\eta}_k \boldsymbol{\eta}_k^T \rangle \end{cases}$$



$$S_k = (V_k + H_k \mathbf{C}_{k-1} H_k^T)^{-1}$$

$$K_k = \mathbf{C}_{k-1} H_k^T S_k$$

$$\zeta_k = \mathbf{m}_k - H_k \mathbf{r}_{k-1}$$

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_{k-1} + K_k \zeta_k$$

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{C}_{k-1} - K_k H_k \mathbf{C}_{k-1}$$

$$\chi_k^2 = \chi_{k-1}^2 + \zeta_k^T S_k \zeta_k$$



KFParticle package

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



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



Topological constraint

Forza la traiettoria della particella a passare dal vertice di produzione noto \mathbf{v}_{pv} :

$$\mathbf{v} - s \cdot \mathbf{p} = \mathbf{v}_{pv}$$

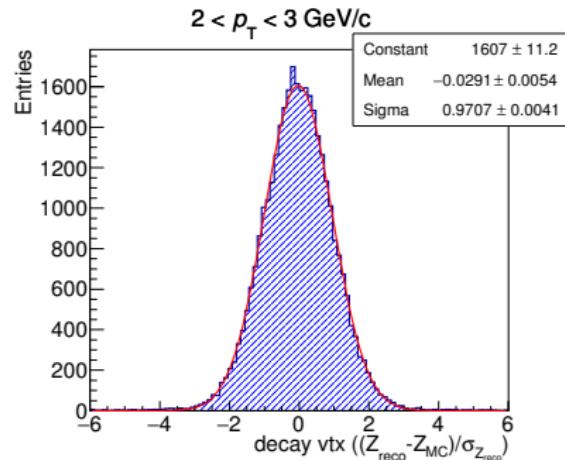
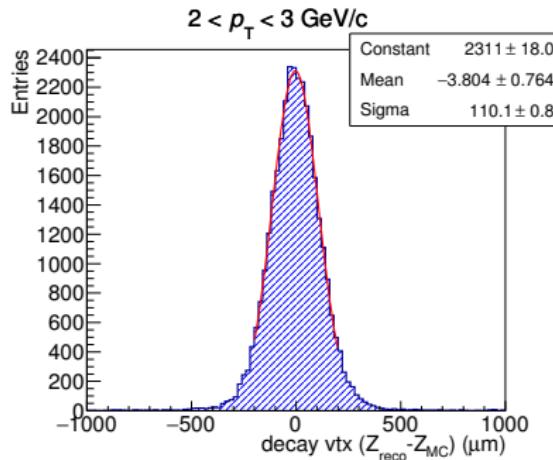
Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Risoluzione e pulls

Risoluzione

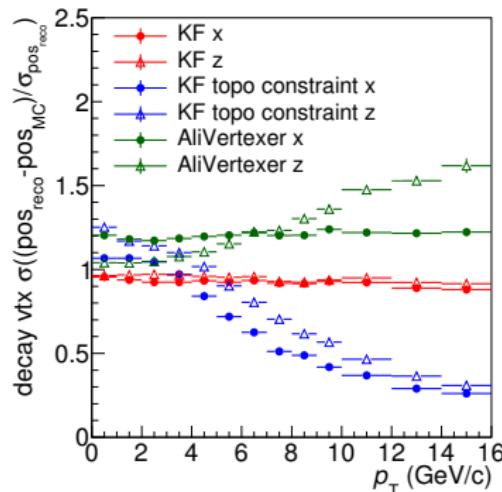
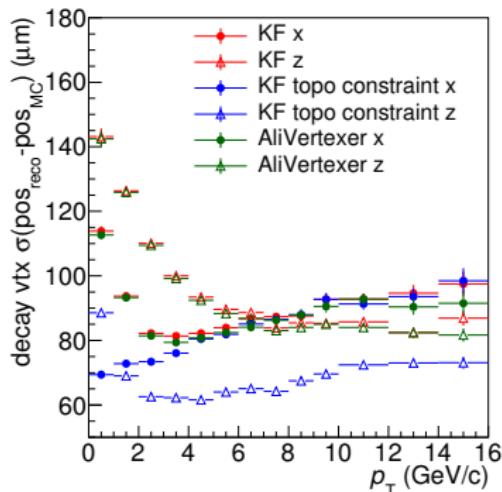
$$Res(p_T) = \sigma(X_{reco} - X_{MC})(p_T)$$

Pull

$$Pull(p_T) = \sigma\left(\frac{X_{reco} - X_{MC}}{\sigma_{X_{reco}}}\right)(p_T)$$

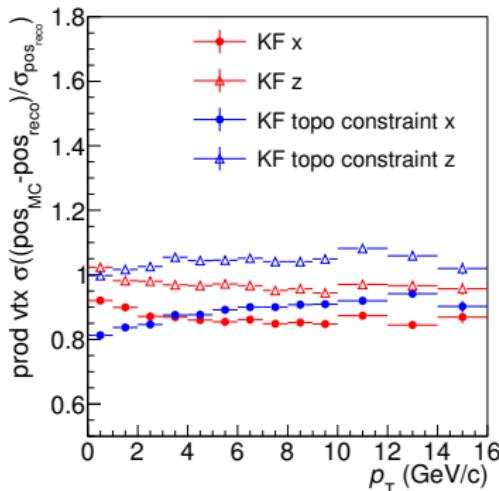
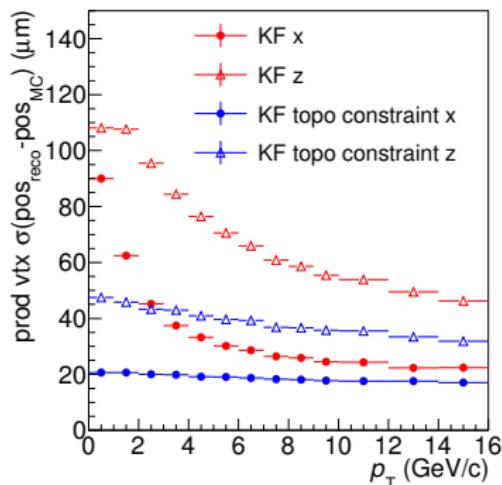


Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Vertice di decadimento



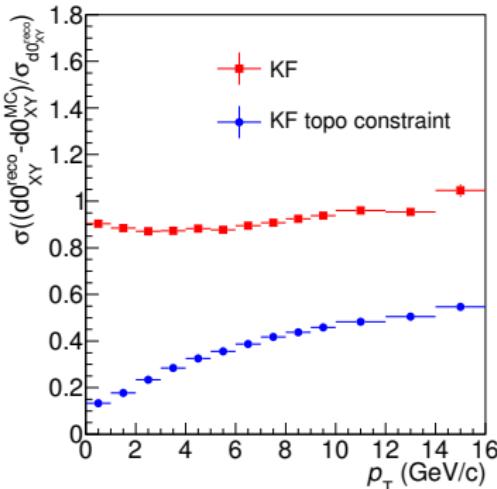
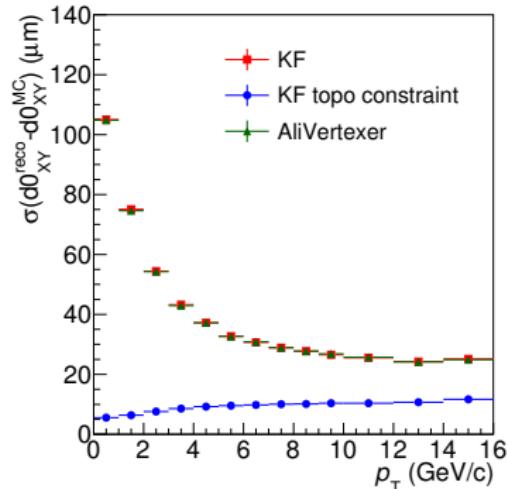
- La risoluzione ottenuta con usando il pacchetto KFParticle è simile a quella ottenuta con l'algoritmo standard se nessun vincolo è fissato, mentre è migliore nel caso in cui il topological constraint è applicato
- I pull indicano una buona stima dell'errore nel caso di KFParticle senza vincoli, una sottostima nel caso dell'algoritmo standard (fino a ~40% per la coordinata z) e sovrastima nel caso di topological constraint (fino a ~80%)

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Vertice di produzione



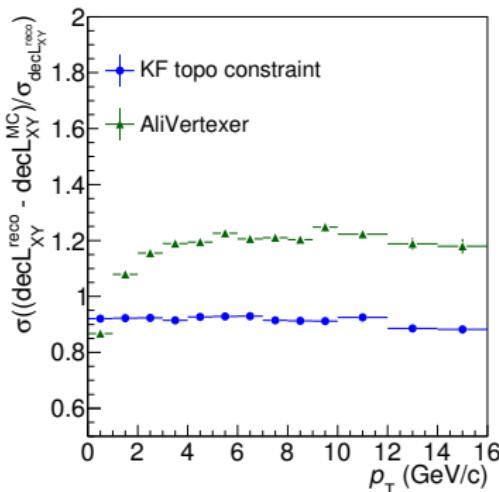
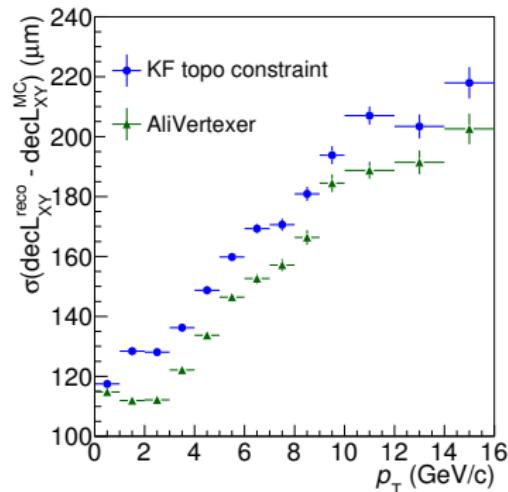
- La risoluzione ottenuta con usando il pacchetto KFParticle è simile a quella ottenuta con l'algoritmo standard se nessun vincolo è fissato, mentre è migliore nel caso in cui il topological constraint è applicato come atteso
- In entrambi i casi i pull indicano una buona stima dell'errore per la coordinata z e una sovrastima di $\sim 20\%$ per la coordinata x

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Parametro di impatto



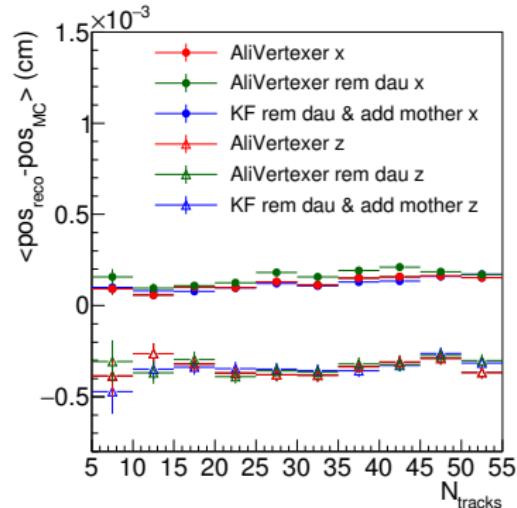
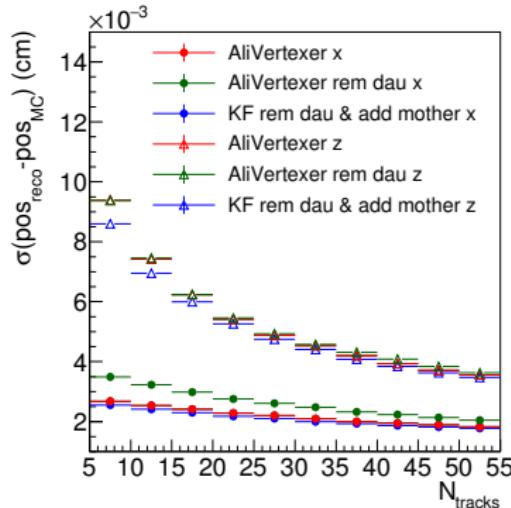
- Come atteso, la risoluzione ottenuta applicando il topological constraint è migliore rispetto al caso in cui nessun vincolo è applicato
- I pull indicano una buona stima dell'errore nel caso di KFParticle senza vincoli e una sovrastima (fino a ~80%) nel caso in cui il topological constraint è applicato

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Lunghezza di decadimento



- La lunghezza di decadimento valutata con l'algoritmo standard è calcolata come la distanza tra vertice primario e secondario, mentre con il KFParticle corrisponde al *signed path s*
- La risoluzione è migliore nel caso dell'algoritmo standard
CAVEAT: il valore MC è valutato con la distanza tra vertice primario e secondario
- I pull indicano una sovrstima dell'errore (circa ~10%) nel caso di KFParticle con topological constraint e una sottostima (fino a ~20%) nel caso dell'algoritmo standard

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Vertice primario



Risoluzione del vertice primario valutata in funzione del numero di tracce usate per la determinazione del vertice:

- utilizzando l'algoritmo standard, per eventi con almeno un mesone D⁺
- utilizzando l'algoritmo standard, per eventi con almeno un mesone D⁺, rimuovendo le tracce delle figlie del mesone D⁺
- utilizzando il KFParticle, per eventi con almeno un mesone D⁺, rimuovendo le figlie e aggiungendo il mesone D⁺

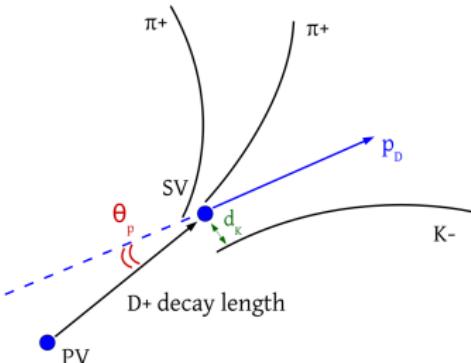
Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Set di tagli

L_{xy} normalizzata

$$\text{Norm. } L_{xy} = L_{xy} / \sigma_{L_{xy}}$$

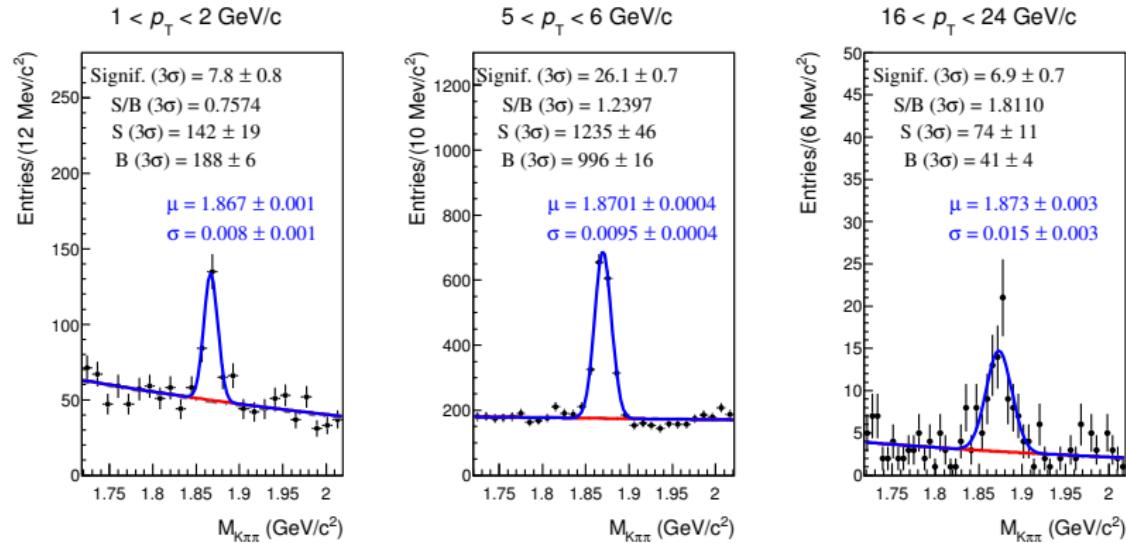
Sigma vertex

$$\sigma_{vertex} = \sqrt{d_K^2 + d_{\pi_1}^2 + d_{\pi_2}^2}$$



p_T (GeV/c)	[1,2]	[2,3]	[3,8]	[8,12]	[12,16]	[16,24]
p_T^{dau} (GeV/c) >	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Norm. L_{xy} >	6	5	5	5	6	6
$\cos(\theta_P) >$	0.985	0.985	0.985	0.985	0.985	0.985
σ_{vertex} (cm) <	0.030	0.030	0.034	0.050	0.050	0.050
$\chi^2/ndf <$	2.5	3.0	3.0	3.5	3.5	4.0

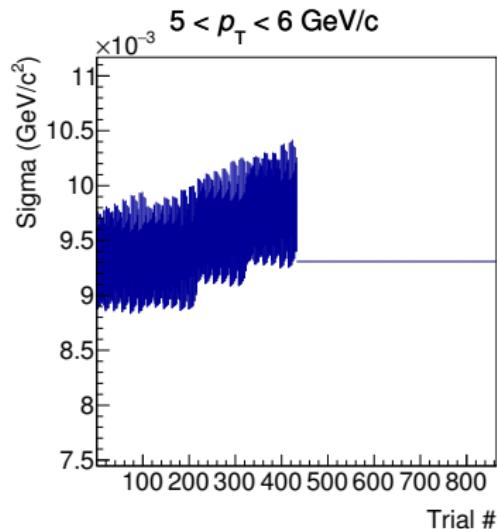
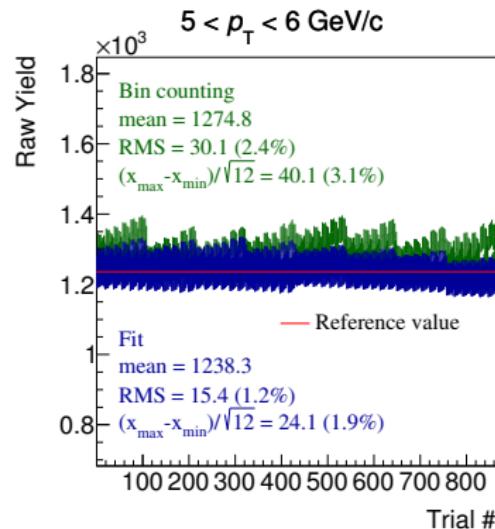
Ricostruzione dei mesoni D^+ con il pacchetto KFParticle - Estrazione del segnale



A basso e ad alto momento trasverso la significatività statistica è più bassa a causa della strategia di PID più selettiva utilizzata (basso p_T) e alla scarsa statistica (alto p_T)

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Errori sistematici

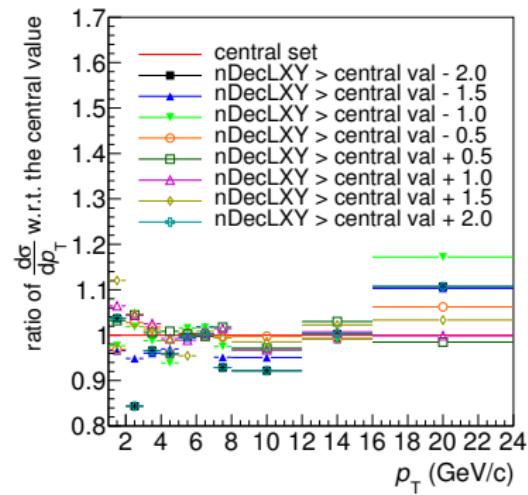
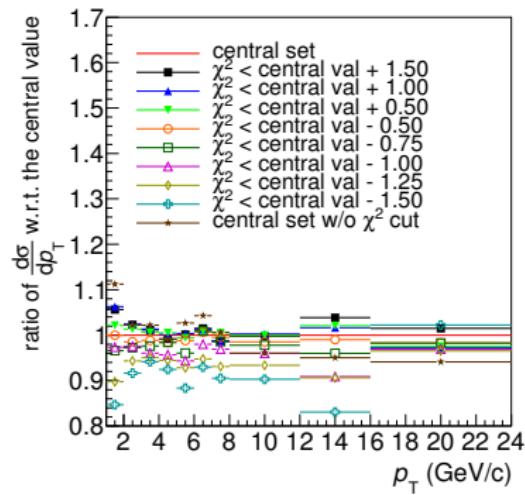
Estrazione del segnale



p_T (GeV/c)	[1, 2]	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 7]	[7, 8]	[8, 12]	[12, 16]	[16, 24]
segnale	10%	8%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	8%	8%

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Errori sistematici

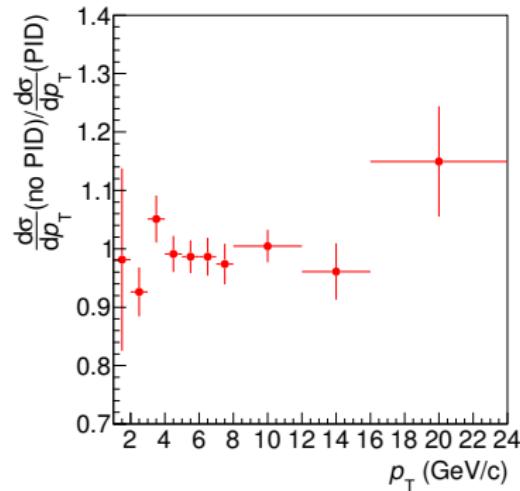
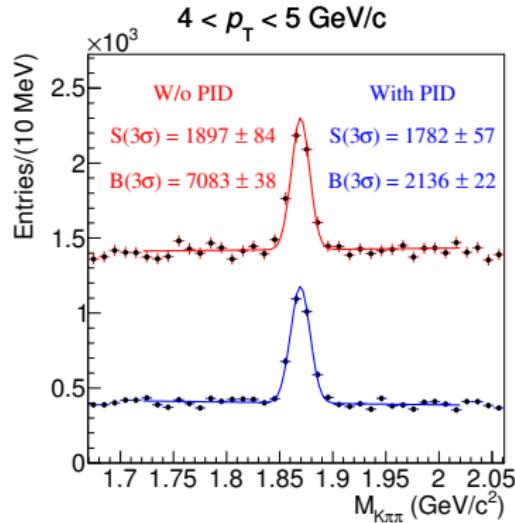
Variazione dei tagli



p_T (GeV/c)	[1, 2]	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 7]	[7, 8]	[8, 12]	[12, 16]	[16, 24]
variazione tagli	10%	10%	6%	6%	6%	5%	5%	5%	5%	5%

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Errori sistematici

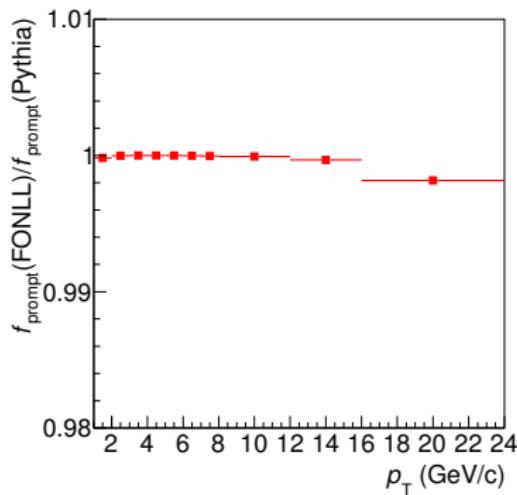
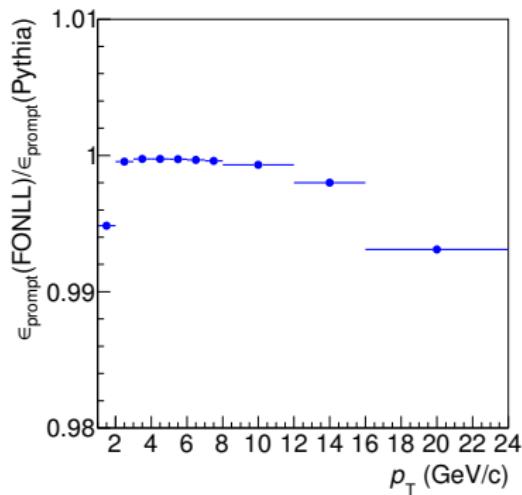
Efficienza di selezione della PID



$p_T (\text{GeV}/c)$	[1, 2]	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 7]	[7, 8]	[8, 12]	[12, 16]	[16, 24]
PID	negl.	negl.	negl.							

Ricostruzione dei mesoni D⁺ con il pacchetto KFParticle - Errori sistematici

Forma degli spettri in p_T di mesoni D⁺ e B generati



p_T (GeV/c)	[1, 2]	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]	[5, 6]	[6, 7]	[7, 8]	[8, 12]	[12, 16]	[16, 24]
distribuzione p_T	1%	1%	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	negl.	1%