

Università degli Studi di Bari

Dipartimento Interateneo di Fisica “M. Merlin”

Scuola di dottorato di ricerca in Fisica XXIX ciclo
Relazione sulle attività del primo anno di dottorato

Dottorando: Dr. Leonardo Cristella

Tutore: Dr. Alexis Pompili

9 Dicembre 2014

In relazione al primo anno del Dottorato di ricerca in Fisica si illustra l'attività di ricerca nella sezione 1 e si presenta il resoconto dell'attività didattica nella sezione 2.

1 Attività di ricerca

1.1 Introduzione

La descrizione di mesoni e barioni come combinazioni senza colore rispettivamente di una coppia quark-antiquark e tre quark risale al *Constituent Quark Model* (CQM, Gell-Mann e Zweig, 1964). Con lo sviluppo della *Quantum Chromodynamics* (QCD) apparve chiaro che non vi fossero ragioni fondamentali perchè quelle fossero le uniche possibili aggregazioni di quark (Jaffe e altri). Vennero proposte aggregazioni non ordinarie quali molecole adroniche, tetraquark, ibridi (con ulteriori gradi di libertà gluonici) e persino *glueballs*, ma fino a tempi recenti non si aveva evidenza sperimentale per stati di questo tipo. Negli ultimi dieci anni, sia con esperimenti alle *B-factories* (BaBar, Belle) che ai collisionatori adronici (Tevatron, LHC) sono stati osservati una ventina di stati *charmonium-like* con massa al di sopra delle soglie di open-charm ($D\bar{D}$, $D\bar{D}^*$, $D^*\bar{D}^*$, $D_s^*\bar{D}_s^*$, ...), denominati stati XYZ. Questi ultimi risultano avere caratteristiche (massa, larghezza, *rate* di decadimento) non compatibili con gli spettri predetti dal *Quark Potential model*, cioè da un modello che invece descrive con estremo successo gli

stati dello spettro del charmonio al di sotto delle suddette soglie (charmonio convenzionale). Questi stati possono essere interpretati secondo i modelli esotici citati sopra (e sono quindi candidati adroni esotici). La natura di questi stati rimane ancora oggetto di interpretazione e di molti non sono ancora stati determinati sperimentalmente i numeri quantici. Per esempio del primo adrone esotico ad essere osservato alle *B-factories* nel 2003, lo stato $X(3872)$, la collaborazione LHCb è riuscita a determinarne lo spin-parità solo nel 2013.

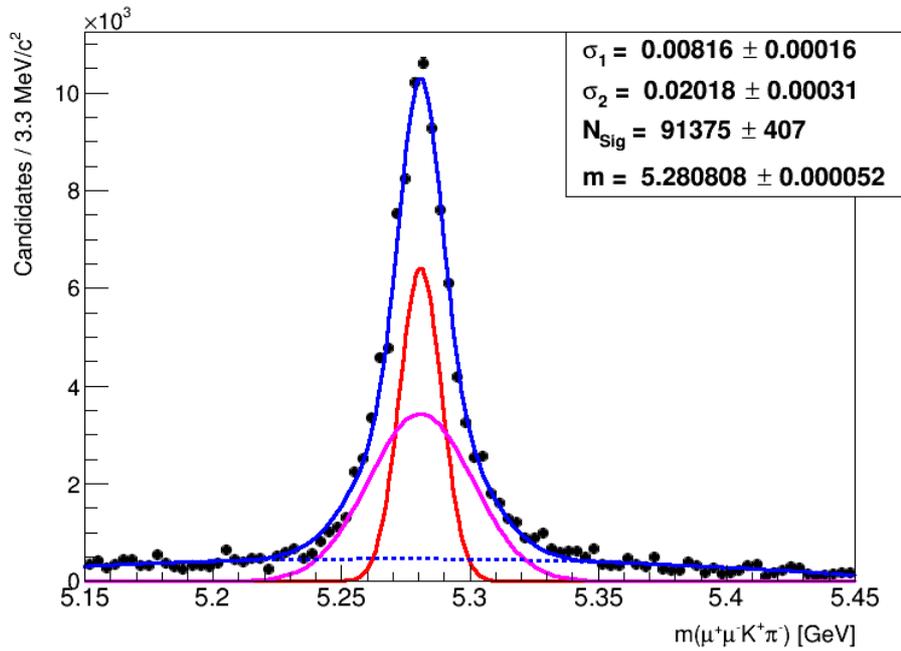
1.2 Ricerca della $Z(4430)^-$

L'attività di ricerca svolta nel primo anno di dottorato si è concentrata sulla ricerca dello stato carico $Z(4430)^-$, osservato dall'esperimento Belle nel 2008 nel decadimento $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^+\pi^-$: la $Z(4430)^-$ sarebbe uno stato intermedio che decade in $\psi(2S)\pi^-$. Trattandosi di uno stato carico questo stato è il più significativo candidato esotico di tipo tetraquark finora osservato. Ne deriva l'importanza di studiarlo anche in CMS. Questa osservazione è stata oggetto di controversia, anche metodologica, con l'esperimento BaBar che, nel 2009, effettuando una *partial wave decomposition* ha suggerito che le strutture dello spettro $\psi(2S)\pi^\pm$ potessero essere descritte come riflessioni dell'insieme dei principali stati eccitati K^* . Belle ha poi riconfermato l'osservazione della $Z(4430)^-$ con un'analisi di Dalitz Plot fit e recentemente LHCb ne ha confermato l'esistenza, misurandone i numeri quantici ($J^P = 1^+$) e verificando la sua natura risonante.

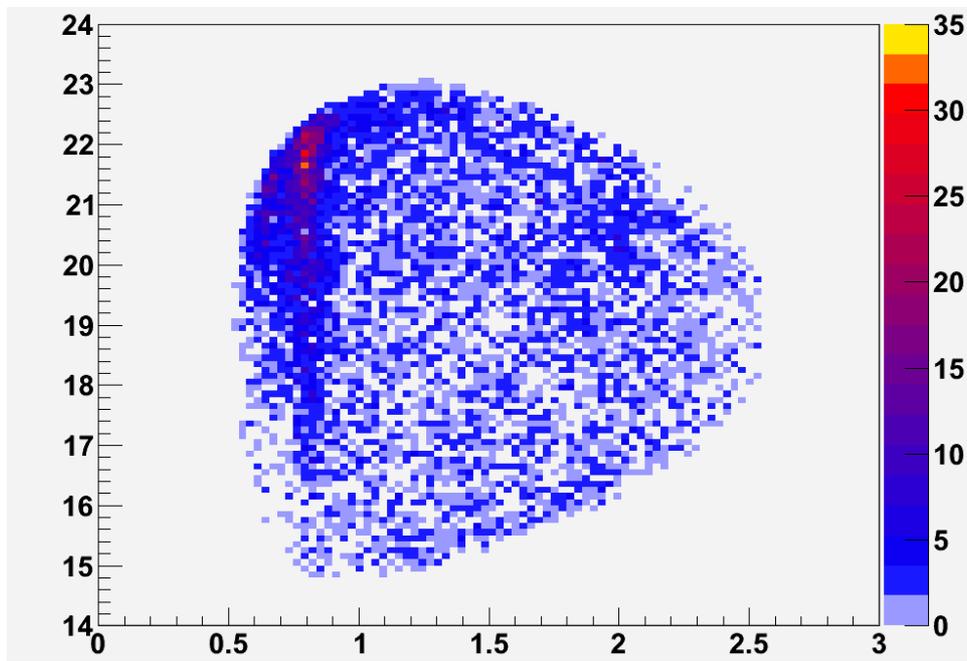
In CMS già con i dati del 2011 sono stati avviati studi preliminari per la ricostruzione ed estrazione del segnale $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^+\pi^-$ (3200 candidati con una purezza del 40%), come mostrato in Fig. 1.

Grazie agli stessi trigger di alto livello di tipo “ $\psi(2S)$ inclusivo” è stata effettuata anche la ricerca di un segnale nella massa invariante $\psi(2S)\pi^-$ in caso di produzione inclusiva, cioè in processi del tipo $pp \rightarrow Z(4430)^- + X$. Tale ricerca, discussa in breve nel paragrafo 1.2.1, è stata effettuata usando i dati 2011 e 2012 senza trovare alcun segnale significativo. La ricerca inclusiva è un'analisi più semplice del canale esclusivo ma dall'esito del tutto incerto dato che la sezione d'urto di produzione inclusiva della $Z(4430)^-$ è sconosciuta (e sicuramente molto piccola, per esempio molto inferiore a quella della $X(3872)$) e la sua larghezza è $\sim 150 - 200 MeV$ secondo le ultime stime di Belle e LHCb. Le due analisi sono complementari.

Nell'ambito della ricerca esclusiva, per poter distinguere la traccia associata al kaone carico da quella associata al pione carico, è stato condotto uno studio sulla possibilità di sfruttare l'energia rilasciata dalle particelle (dE/dx) nell'attraversare il tracciatore CMS.



(a)



(b)

Figura 1: (a) Fit della distribuzione di massa invariante $m^2(\psi(2S)K^+\pi^-)$ eseguito con due gaussiane e un polinomio di primo grado; (b) Dalitz plot della massa invariante $m^2(\psi(2S)\pi^-)$ verso $m^2(K^+\pi^-)$.

1.2.1 Ricerca inclusiva

Per questa analisi sono stati impiegati tutti i dati raccolti dall'esperimento CMS sia nel 2011 che nel 2012, preselezionati e filtrati nel "MuOnia primary dataset" e corrispondenti alla luminosità integrata di circa 23 fb^{-1} . Dal momento che sia J/ψ che $\psi(2S)$ decadono in coppie $\mu^+\mu^-$, l'analisi è stata eseguita sugli eventi selezionati da un *trigger* di alto livello di doppio muone. La decisione finale di *trigger* è presa in base alle informazioni fornite dal tracciatore interno e dalle camere a muoni.

Nell'ambito del *framework* di CMS, è stato implementato un algoritmo di ricostruzione del canale che analizza gli eventi preselezionati. Esso esegue la ricostruzione di $\psi(2S)$ a partire dai due muoni di segno opposto presenti nell'evento, che sono combinati in un *fit* con il vincolo che provengano da un vertice comune. L'evento è ulteriormente analizzato solo se la massa invariante dei due muoni, ottenuta dalla composizione dei quadrivettori impulso nel *fit* al vertice, è compresa in un'opportuna finestra di massa centrata sul valore nominale della $\psi(2S)$.

Si procede successivamente con la ricostruzione del $\psi(2S)\pi^\pm$, per combinazioni di una traccia con la coppia di muoni. Si assegna alla traccia la massa nominale del pione carico e si esegue un *fit* al vertice con le tracce dei due muoni e del pione, vincolando contemporaneamente la massa invariante della coppia di muoni al valore nominale della massa di $\psi(2S)$. Si ottengono in tal modo dei candidati $\psi(2S)\pi^\pm$, che nell'analisi finale vengono sottoposti ad un insieme di criteri di selezione relativi a:

- qualità dei muoni e delle tracce,
- accettazione cinematica,
- qualità dei fit di due e tre tracce,
- compatibilità topologica fra candidato $\psi(2S)$ e tracce.

Nello studio dello spettro di massa invariante di $\psi(2S)\pi^\pm$ si è separata la componente *prompt* dalla componente *quasi-prompt* e *non-prompt*. La separazione delle due componenti viene definita a partire dalla significatività del tempo proprio τ di ciascun candidato, nel modo seguente:

- se il rapporto $\frac{c\tau}{\sigma(c\tau)} < 1.8$, si sta considerando la sola componente *prompt*; le 3 tracce provengono dalla regione in prossimità del vertice primario,
- se il rapporto $\frac{c\tau}{\sigma(c\tau)} > 3$, si sta selezionando la componente *non-prompt*, che si riferisce a candidati prodotti in un vertice secondario, ben distinguibile da quello primario,
- se $1.8 < \frac{c\tau}{\sigma(c\tau)} < 3$, si sta considerando la componente intermedia *quasi-prompt*.

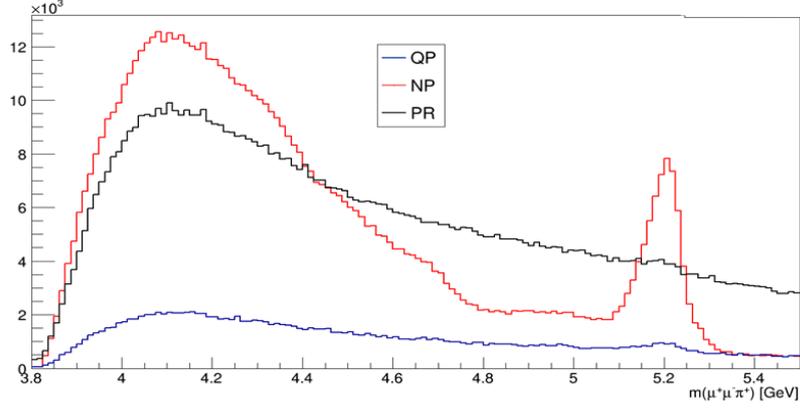


Figura 2: Spettro di massa invariante $\psi(2S)\pi^\pm$ in cui le componenti *prompt*, *quasi-prompt* e *non-prompt* sono sovrapposte.

Nel secondo e soprattutto nel terzo spettro ci si aspetta di trovare il segnale associato al decadimento $B^\pm \rightarrow \psi(2S)K^\pm$ dove la traccia carica K^\pm può essere un kaone o un pione.

Il grafico di Fig. 2 rappresenta lo spettro di massa invariante di $\psi(2S)\pi^\pm$ in cui le componenti *prompt*, *quasi-prompt* e *non-prompt* sono distinte. Nella componente *non-prompt* si riconosce chiaramente il picco del mesone B^\pm , che invece nella componente *prompt* è quasi non visibile. Questa particella, avendo tra i suoi canali di decadimento anche $\psi(2S)\pi^\pm$, dovrebbe produrre un picco nella componente non-prompt della distribuzione di massa invariante in esame, intorno al valore della sua massa nominale. Il picco osservato, per la precisione, non va associato al decadimento $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\pi^\pm$, che è Cabibbo-soppresso, ma è principalmente l'effetto della riflessione del decadimento Cabibbo-favorito $B^\pm \rightarrow \psi(2S)K^\pm$. Tale riflessione è presente in quanto la traccia non è soggetta ad una selezione basata su qualche criterio di identificazione di particelle e ad essa viene semplicemente assegnata la massa del pione carico. L'effetto della riflessione si può apprezzare dal fatto che il picco è centrato su valori di massa inferiori alla massa nominale del B^+ (pari a $5.278\text{GeV}/c^2$).

1.2.2 Analisi dello spettro di massa invariante del sistema $\psi(2S)\pi^\pm$ con $\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$

Dopo aver applicato un primo insieme di criteri di selezione, si è approfondita l'analisi dello spettro di massa invariante del sistema $\psi(2S)\pi^\pm$, applicando tagli sempre più stringenti all'impulso trasverso delle particelle in gioco (Fig. 3), nel seguente ordine:

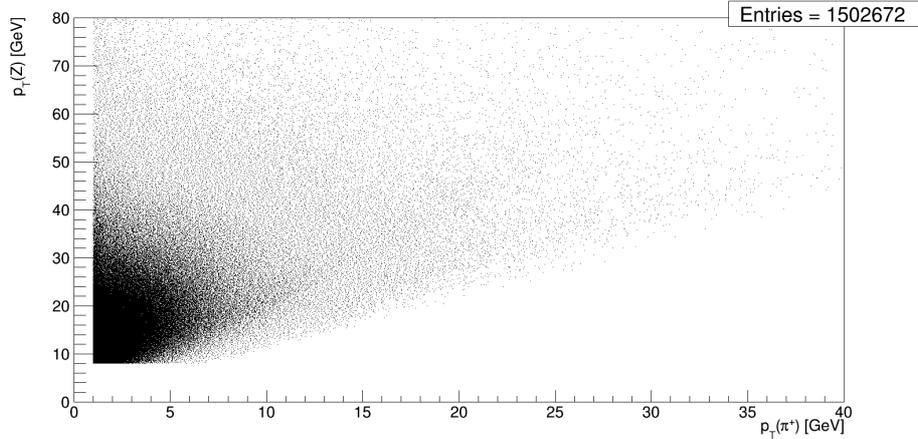


Figura 3: Distribuzione dell'impulso trasverso di ciascun candidato $\psi(2S)\pi^\pm$ in funzione del p_T del pione usato per ricostruire lo stesso candidato.

- tagli sull'impulso trasverso del pione,
- tagli sull'impulso trasverso del sistema $\psi(2S)\pi^\pm$,
- tagli sia sul p_T del pione sia sul p_T di $\psi(2S)\pi^\pm$.

In Fig. 4 sono riportati gli spettri di massa invariante prodotti da alcuni dei tagli citati sopra.

1.2.3 Studio della dE/dx

Una stima della massa di ogni traccia può essere ottenuta combinando le misure di:

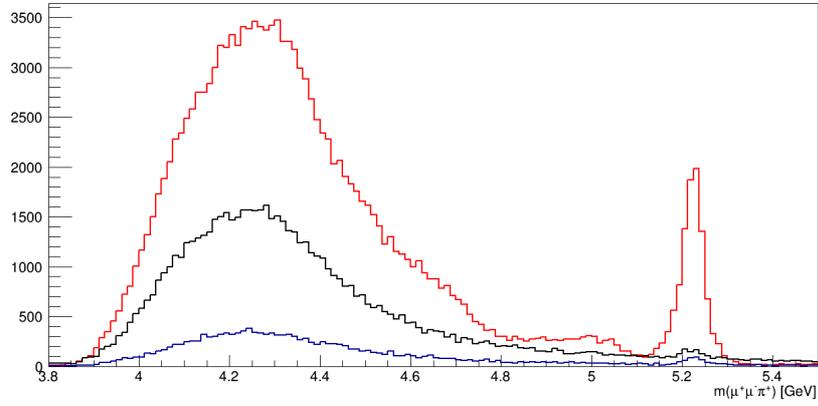
- momento
- perdita di energia per ionizzazione fornita dagli estimatori di dE/dx

Per momenti inferiori alla regione di minima ionizzazione vale la relazione

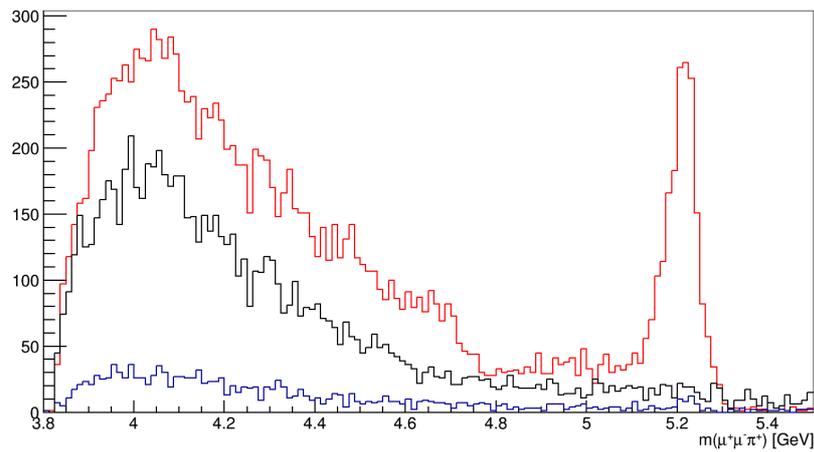
$$\frac{dE}{dx} = K \frac{m^2}{p^2} + C$$

dove i parametri K e C sono determinati da un fit. Invertendo l'equazione si può ottenere la massa m della particella.

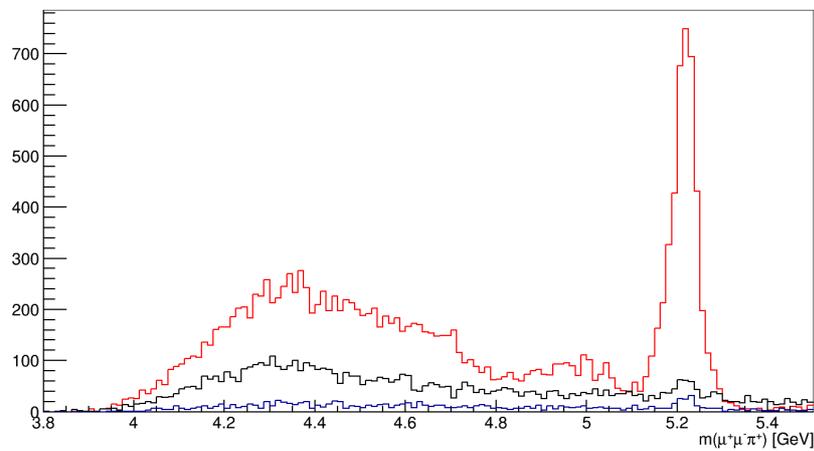
Aggiungendo una seconda traccia al campione di dati usato per la ricerca inclusiva, si è ricostruito il canale di decadimento $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^+\pi^-$. Dopo aver applicato una selezione che consente di estrarre un segnale del B^0 abbastanza puro (Fig. 1), sfruttando il segnale del K^* nel decadimento



(a)



(b)



(c)

Figura 4: Distribuzioni di massa invariante $\psi(2S)\pi^\pm$ dopo i tagli: $p_T(\pi^\pm) > 3 \text{ GeV}/c$ in (a), $p_T(Z^-) > 40 \text{ GeV}/c$ in (b), $p_T(\pi^\pm, Z^-) > (3, 40) \text{ GeV}/c$ in (c).

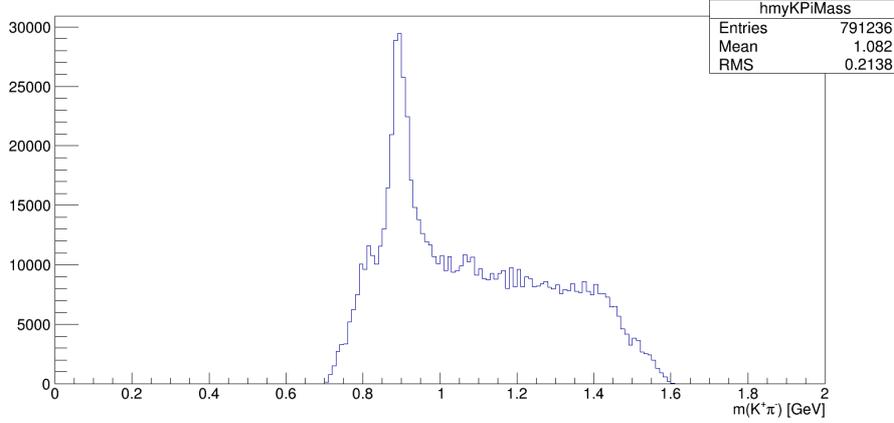


Figura 5: Distribuzione della massa invariante $m(K^+\pi^-)$ per quei candidati con $5.25 < m(\psi(2S)K^+\pi^-) < 5.30 \text{ GeV}/c^2$.

$B^0 \rightarrow \psi(2S)K^*$ (Fig. 5), si è ricavata la distribuzione della variabile dE/dx verso l'impulso delle tracce per quei candidati con $0.95 < m(K^+\pi^-) < 1.05 \text{ GeV}/c^2$, come mostrato in Fig. 6. Da questo studio preliminare non sembra sia possibile usare l'informazione della dE/dx per tracce di basso impulso ($0.4 \div 0.7 \text{ GeV}/c$) per distinguere i kaoni dai pioni.

1.3 Sviluppo del codice di validazione dei *MiniAOD*

In supporto all'attività di ricerca descritta il sottoscritto ha svolto uno stage collaborativo al CERN della durata di 3 mesi (Maggio-Luglio) in cui ha lavorato allo sviluppo del codice di validazione del nuovo formato di dati chiamato *MiniAOD*.

Il *MiniAOD* è un nuovo *data tier* di “alto livello” introdotto nei primi mesi del 2014 per soddisfare le richieste della maggior parte delle analisi all'interno della collaborazione CMS, mantenendo allo stesso tempo piccola la dimensione di archiviazione degli eventi (30-50 kb/evento).

1.4 Attività previste per il secondo anno di dottorato

Nel secondo anno di dottorato si prevede di contribuire, all'interno del gruppo *B-Physics* di CMS, alle seguenti analisi:

1. studio del decadimento $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^+\pi^-$ estraendo un segnale B^0 abbastanza puro e statisticamente sufficiente per confermare l'esistenza della $Z(4430)^-$ come uno stato risonante nel decadimento *quasi-two body* $B^0 \rightarrow Z^-K^+$, in cui $Z^- \rightarrow \psi(2S)\pi^-$.

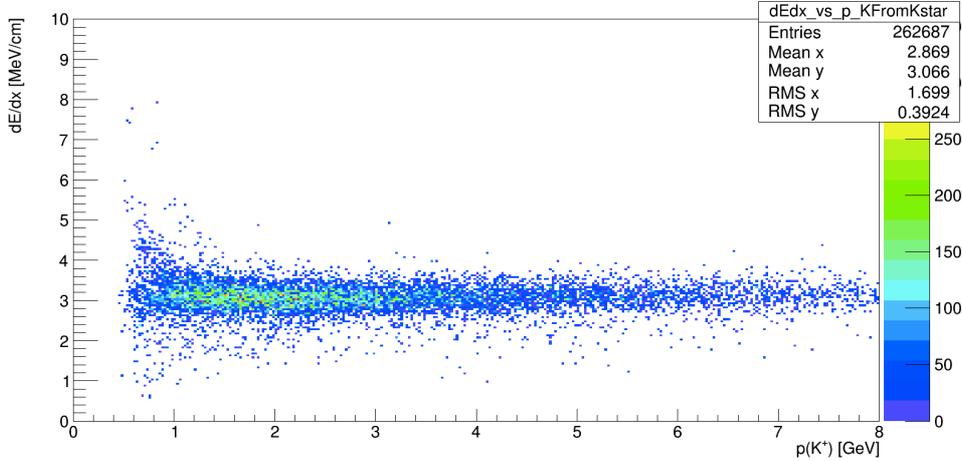


Figura 6: Scatter plot della variabile dE/dx verso l'impulso della traccia a più basso impulso nel processo $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^*$, $K^* \rightarrow K^+\pi^-$.

2. esplorare la natura dei due picchi osservati nello spettro di massa $J/\psi\phi$ nel decadimento esclusivo $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$.

A tal proposito lo stato $Y(4140)$, osservato da CDF, è stato recentemente confermato da CMS (ma non da LHCb) attraverso lo studio dello spettro di massa $J/\psi\phi$ nel decadimento $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ al quale il sottoscritto ha partecipato nell'ambito della propria tesi magistrale. Per questo stato sono state avanzate diverse interpretazioni, nessuna delle quali del tutto convincenti: molecola $D_s^*\bar{D}_s^*$, tetraquark $cs\bar{c}\bar{s}$, effetto cinematico in soglia, charmonio ibrido, transizione debole con rescattering $D_s\bar{D}_s$. Entrambe le analisi richiedono l'uso della totalità dei dati raccolti da CMS nel Run-I al fine di estrarre segnali B abbastanza puri da consentire una *full amplitude analysis*. Quest'ultima è necessaria per accertare la presenza e lo spin-parità di uno stato intermedio risonante in un decadimento a 3 corpi con almeno un vettore nello stato finale. In particolare la seconda analisi andrebbe aggiornata con i dati raccolti nel 2012 per riuscire a studiare compiutamente, mediante la *full amplitude analysis*, le possibili riflessioni dal sistema ϕK^+ e gli effetti legati alla eventuale polarizzazione dei vettori nello stato finale. La presenza di 2 vettori nello stato finale rende quest'analisi più complicata rispetto a quella della $Z(4430)^-$, caratterizzata da un solo vettore nello stato finale. Le due analisi richiedono una sinergia nello sviluppo del metodo dell'*amplitude analysis*.

Un canale che andrebbe parimenti studiato è il decadimento $B^0 \rightarrow J/\psi\phi K_s^0$ (caratterizzato da un rapporto di diramazione più piccolo ma anche da un fondo ridotto grazie alla "segnatura" del K_s^0).

2 Attività didattica

L'attività didattica svolta nel primo anno di dottorato si articola nei seguenti corsi, scuole e workshop.

Corsi sostenuti:

- Corso di “Ricerca in Europa”
- Corso di “Europrogettazione”
- Corso di “Sistemi operativi e Bash”
- Corso di “Data mining”
- Corso di Inglese dal titolo “How to prepare a technical speech in English”
- Corso di “Fenomenologia delle interazioni fondamentali”
- Corso di “Rivelatori di particelle innovativi e loro applicazioni”

Scuole frequentate:

- CMS Data Analysis School (CERN, 13-18 Gennaio 2014)
- XXVI Seminario Nazionale di Fisica Nucleare e Subnucleare “Francesco Romano” (Otranto, 4-11 Giugno 2014)
- INFIERI 2nd International Summer School (Parigi, 14-25 Luglio 2014)
- HPSS 2014 (Gießen, 1-5 Settembre 2014)

Workshop e conferenze:

- CMS week (CERN, 24-28 Febbraio 2014)
- ‘What Next’ INFN (Roma, 7-8 Aprile 2014)
- Run 2 B-Physics Analyses Workshop (Venezia, 14-15 Aprile 2014)
- Giornate di Studio sul Piano Triennale INFN (Trento, 7-8 Novembre 2014)
- International Workshop on Heavy Quarkonium 2014 (CERN, 10-14 Novembre 2014)

Leonardo Cristella