

8 de septiembre 2023

## Ejercicio sesión 4

### Análisis de asimetrías en el decaimiento $B \rightarrow KKK$

Hemos llegado al final del taller y con eso a nuestro ejercicio final. Este ejercicio se encuentra en los proyectos abiertos de la colaboración LHCb y contiene la mayor parte de elementos que se utilizan en análisis de datos que se realizan dentro de la colaboración. En esta ocasión vamos a calcular asimetrías en el decaimiento de un meson  $B$  en tres kaones. El meson  $B$  está compuesto por quarks  $ub$  y posee una masa de  $5279,29 MeV$ , lo que le otorga al decaimiento un espacio de fase relativamente grande y se espera la participación de varios estados intermediarios en el decaimiento. Además el tiempo de decaimiento de estas partículas es demasiado corto  $10^{-12}$  lo que dificulta su detección directa; por este motivo se usa las magnitudes físicas medidas de los kaones para reconstruir la masa, momento y energía del meson  $B$ . Para realizar estudios de eficiencia y aceptación del detector, se suele usar software del LHCb para generar decaimientos simulados. Primero vamos a utilizar los datos simulados que se encuentran en el archivo `PhaseSpaceSimulation.root` para reconstruir la masa, momento y energía del meson  $B$ .

#### 0.1 Reconstruir la masa del mesón $B$ para los datos simulados

En el set de datos simulados ustedes pueden encontrar el momento en las tres direcciones para las partículas H1, H2, H3. En un experimento real, no conocemos con certeza si estas partículas son o no kaones pero se utiliza variables relacionadas a probabilidades para tomar decisiones de corte en los datos. En la simulación se garantiza por supuesto que todas estas partículas sean kaones en efecto. En el archivo de datos simulados se encuentra solo los valores para el momento de las partículas, para calcular la energía pueden tomar la masa nominal del kaon que se puede encontrar en la base de datos del PDG (Particle Data Group). (**Nota:** tomar en cuenta las unidades!).

Ahora a partir de esto ¿cómo calculamos la masa del meson  $B$ ?, utilizando la relación de masa energía que se encuentra en la ecuación abajo.

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (1)$$

De esta forma podemos calcular la energía para cada uno de los kaones. Una vez que tenemos la energía calculada, podemos usar la conservación de momento (recuerden el momento se conserva en cada eje) y energía para calcular estas magnitudes para el meson  $B$ :

$$E_{in} = E_{fin} \quad (2)$$

$$p_{i,ini} = p_{i,fin} \quad (3)$$

Una vez que tienen las componentes de momento y energía para el mesón  $B$ , pueden determinar la distribución de masa usando la relación de momento-energía nuevamente. **Pregunta:** ¿por qué no se incluyen los factores de  $c$  en la fórmula de masa energía?

### Objetivos

- Crear una Macro que tome el archivo simulado y determine la distribución de masa invariante para el meson  $B$ .
- En la misma Macro escribir código para plotar dos canvas: una con cuatro pads (canvas dividida en 4) con las distribuciones de momento y energía para el meson  $B$ . La otra canvas solo debe contener la distribución de masa invariante. Guardar ambas canvas como archivos `.png`
- Para puntos extra: guardar estas nuevas variables en la misma TTree que tomaron del archivo.

## 0.2 Análisis con datos reales

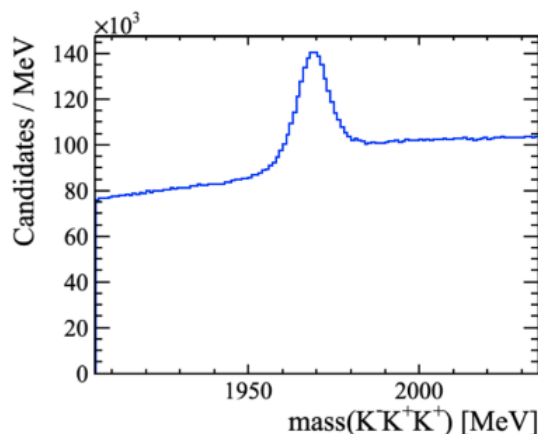
Ahora llegó la hora de trabajar con datos reales, pero antes de poder realizar análisis con estos datos debemos realizar cortes para reducir los niveles de background. En general buscamos cortes que reduzcan el background combinatorial manteniendo el valor de la significancia alto. La significancia está definida de la siguiente manera:

$$S = \frac{s}{\sqrt{b+s}} \quad (4)$$

,donde  $s$  son los eventos de señal y  $b$  el número de eventos de background. Estos cortes se hacen usando el espectro de masa para reducir el background dentro de esta distribución, generalmente usando fitting con RooFit.

### Objetivos

En esta parte del ejercicio, ustedes van a hacer lo mismo que hicieron con los datos de la simulación, pero esta vez van a simplemente plotar un histograma con el espectro de masa del meson  $B$ . Los dos archivos de datos que deben cargar en ROOT se encuentran en la página del taller. Cuando ploten el histograma debe ser parecido a la figura que se encuentra abajo con un pico centrado en la masa del mesón  $B$ :



En la figura se observa un pico en la masa del meson  $D$  (este no es el gráfico que ustedes deben obtener pero es parecido) y un background que tiene una forma casi lineal. El objetivo de realizar cortes en las variables es para reducir esta distribución de background. Los cortes que van a realizar tienen que seguir los siguientes criterios:

- Asegurarse que las partículas candidatas H1, H2, H3 no son muones (usando la variable que muestra la probabilidad de ser muon **isMuon**).
- Requerir que la probabilidad de ser pion sea baja (un poco menor a 0.5)
- Requerir que los candidatos tengan una probabilidad alta de ser kaones (por lo menos mayor a 0.5)

Una vez que realizan los cortes deben observar cualitativamente los mejores cortes para reducir el background combinatorial. (Este proceso se realiza usualmente calculando la significancia cada vez que se hace un corte y los eventos de señal y background se toman en base a un fit de masa realizado en RooFit. En este caso no voy a pedir que implementen esto, dado que también los resultados dependen del modelo teórico que se utilice y eso depende de la forma del background. Sin embargo, lo dejo como una curiosidad para aquellos que quieran realizar el fit de masa. Les compartiré una Macro que realiza este proceso para un meson  $D$

y que puede ser aplicada modificando los parámetros). Una vez que hayan realizado los cortes tienen que mostrar el histograma antes y después de los cortes en una imagen (pueden entregarlo como una sola imagen o dos) y los valores de los cortes que usaron deben escribirlos como leyenda en la imagen del histograma. Estos cortes pueden ser realizados usando `for` loops y condiciones `if` pero también existe un método para las clases TH que permite llenar estos histogramas con los cortes directamente (quien encuentre este método tendrá puntos extra).

### 0.3 Calcular asimetrías globales

El objetivo de investigación entorno a violación CP es el cálculo de asimetrías en los datos para identificar (supuestamente) violación CP en diferentes canales de decaimiento (aunque a veces estas asimetrías tienen otro tipo de origen que no es necesariamente violación CP). La asimetría en un set de datos está definida mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{N^- - N^+}{N^- + N^+} \quad (5)$$

donde  $N^-$  son los eventos en los que tenemos el decaimiento de un meson  $B^-$  y  $N^+$  son los eventos en los que tenemos el decaimiento de un meson  $B^+$ . La pregunta es ¿cómo podemos identificar los eventos en los que tenemos  $B^-$  de los que tenemos  $B^+$ ? y la respuesta para eso está en la carga de las partículas que está dada por la variable `Hicharge` (i representa los números 1, 2 o 3 dependiendo de la partícula). Dado que la carga se conserva los eventos con un meson  $B^-$  tendrán una carga total negativa y de la misma forma los eventos con  $B^+$  tendrán una carga total positiva. Ustedes deben crear una macro que calcula las cargas totales por evento y devuelve la posibilidad de que sea un B positivo o negativo (esto puede ser hecho con un `for` loop y deben tomar en cuenta algo importante, este método debe estar implementado después de los cortes entonces tienen que pensar en una forma de implementar estos dos procesos en la misma Macro. HINT: yo utilizaría de la manera simple vectores para guardar los datos luego de que estos son cortados pero otro tipo de métodos pueden ser implementados).

Adicionalmente a esto ustedes van a calcular la incerteza estadística que está dada por la ecuación:

$$A = \sqrt{\frac{1 - A^2}{N^- + N^+}} \quad (6)$$

Su macro debe imprimir en la pantalla estos dos valores (asimetría e incertidumbre en la asimetrías globales) cuando sea corrida. Además de esta fuente de incertidumbres, tenemos también incertidumbres sistemáticas que son calculadas tomando en cuenta los métodos usados en el análisis de datos (en general las incertidumbres relacionadas a la medición son prácticamente despreciables en comparación con las incertidumbres sistemáticas y por eso no se consideran en el análisis).

### 0.4 Dalitz plot

Hemos llegado al final del análisis y para eso vamos a crear Dalitz plot de los datos. Pero ¿qué es un Dalitz plot? Cuando tenemos un decaimiento de una partícula en tres cuerpos por ejemplo nuestro decaimiento  $B \rightarrow KKK$ , este decaimiento se puede describir simplemente con dos grados de libertad, es decir con dos variables. Se puede utilizar cualquier combinación de momento con energía para generar un espacio de fase para este decaimiento pero generalmente se escogen las masas invariantes al cuadrado que están dadas por la ecuación abajo.

$$s_{ij} = (p_i + p_j)^2 \quad (7)$$

donde  $p_j$  son los vectores momento en cuatro dimensiones para un par de partículas. Estas variables cobran más sentido en el siguiente caso: supongamos que la partícula  $B$  no decae directamente en tres partículas pero que decae primero en dos de la siguiente forma  $B \rightarrow RK_3$ , donde  $R$  es un estado intermediario

llamado resonancia y esta resonancia finalmente decae en los estados finales  $R \rightarrow K_1 K_2$ . Entonces la masa invariante  $s_{12}$  será la masa al cuadrado de la partícula intermediaria. Este tipo de estados aparecen en los canales  $R \rightarrow K^+ K^-$  debido a la conservación de carga para quarks. Ustedes van a calcular las masas invariantes para los decaimientos de las partículas  $B^+$  y  $B^-$  y luego construir dos Dalitz plots para los distintos decaimientos. (Esto debe ser implementado después de los cortes realizados).

Ahora ¿cómo calculamos las masas invariantes? Para los casos en que tenemos  $B^+$  buscamos la partícula con carga positiva y calculamos dos masas invariantes con cada una de las cargas negativas y viceversa para decaimientos con  $B^-$  (cuando hacen esto, ustedes calculan un par  $s_{12}$ ,  $s_{13}$  pero ¿cómo se relacionan los valores calculados a  $s_{12}$ , o  $s_{13}$  ? no tienen que hacerlo! porque dado que las partículas del estado final son idénticas, el Dalitz plot es simétrico y cuando ploten estas variables en un histograma van a tener que llenarlo con un mismo evento dos veces, con el par  $(s_{12}, s_{13})$  y con el par  $s_{13}, s_{12}$ . Osea solo una parte del Dalitz plot tiene información relevante y para cada evento pueden llamar a cualquier variable  $s_{12}$  o  $s_{13}$  pero solo una vez). Para calcular las masas invariantes recordamos que :

$$s_{ij} = (p_i + p_j)^2 \quad (8)$$

$$= (E_i + E_j)^2 - (p_{ix} + p_{jx})^2 - (p_{iy} + p_{jy})^2 - (p_{iz} + p_{jz})^2 \quad (9)$$

Después de que tengan los Dalitz plots van a observar las resonancias que se encuentran y van a intentar identificarlas usando los datos para resonancias que se encuentran en el PDG. ¿Cuáles resonancias se encuentran en este canal de decaimiento? (hint: las resonancias aparecen como bandas en cierta región y se centran en la masa de la resonancia).

Todas las gráficas que hagan deben colocarlas en un PDF creado en latex o word o cualquier aplicación que se les haga fácil. Deben también entregar las Macros comentadas con las partes de cada código.

## 0.5 Trabajo extra

Felicidades! después de este análisis ustedes están listos para realizar investigaciones en proyectos pequeños de LHCb, aunque faltan algunos pasos en el análisis que pueden observar y realizar por su propia cuenta con el mismo set de datos en caso de que estén interesados (esto no será calificado).

### Cálculo de asimetrías locales

Una vez que tenemos los Dalitz plots podemos calcular las asimetrías en diferentes regiones del Dalitz plot ¿cómo realizamos esto? Hint: podríamos tomar los datos en cada bin, realizar un fit de masa para reducir el background y después calcular las asimetrías con el contenido de los bins para diferentes binnings.

### Usar las bandas laterales del espectro de masa

Una fuente de eventos "de background" surge de combinaciones aleatorias de trazos en eventos que tienen las características de la "señal". Estos eventos no estarán en el pico en la distribución de masa del mesón  $B$ , sino que tendrán una distribución que varía suavemente. Observando el número y la distribución de eventos fuera del pico de masa puede permitirnos estimar el número de eventos de background bajo el pico de masa.

### Fitar distribuciones

El siguiente nivel de sofisticación en el análisis requiere ajustar las distribuciones de eventos que se observan en la distribución de masa  $B$  para estimar el número de eventos de señal y eventos de background. El ajuste se puede realizar utilizando RooFit.

## Rúbrica

Criterio	Calificación
Se entrega un PDF con las gráficas, métodos y discusión	5 puntos
Se entrega las Macros con los métodos utilizados para realizar el análisis	5 punto
Los códigos dentro de las Macros corren sin errores	5 puntos
Las Macros se encuentran comentadas	5 puntos
Se incluye imágenes de las distribuciones en el caso de la simulación	2 puntos
Se incluye la imagen de la distribución de masa para el mesón B	2 puntos
Se realiza los cortes a los datos y se registran los valores utilizados	2 puntos
Se muestra la diferencia en la distribución de masa B antes y después de los cortes	3 puntos
Se calcula y presenta los valores de la asimetría e incertidumbre	3 puntos
Se calcula las masas invariantes para ambos decaimientos	2 puntos
Se plotan dos Dalitz plots con la distribución de eventos para $B^-$ y $B^+$	3 puntos
Se identifica las resonancias en el canal de decaimiento y se discute sobre ellas	2 puntos
Se responden las preguntas propuestas a lo largo de este documento	1 puntos