

Estudio de la violación CP en los decaimientos de mesones B^\pm mediante análisis de asimetría

Estefanie Alvarez Martínez, Diego Antonio García Chew, Alejandra María Fuentes Debroy

En este informe se analiza la asimetría CP (carga-paridad) dada por los mesones B^\pm a partir del decaimiento del mesón $B^+ \rightarrow K^+ K^+ K^-$ y el mesón $B^- \rightarrow K^- K^- K^+$ utilizando datos recopilados por el detector LHCb durante el año 2011. Donde se obtuvieron los siguientes resultados

$$A_{cp} = -0.047 \pm 0.014(stat) \pm 0.003(sys)$$

I. INTRODUCCIÓN

- Identificación de la desintegración de mesones B
- Estudio de la masa invariante.
- Estudiar y cuantificar la violación de la simetría CP en los decaimientos de mesones B^+ y B^- mediante el análisis de diagramas de Dalitz, con el fin de identificar y caracterizar posibles fuentes de asimetrías, y proporcionar evidencia experimental de la violación de CP en el sector de los mesones B.

Mesones

En física de partículas, un mesón es un tipo de partícula subatómica hadrónica compuesta por un número igual de quarks y antiquarks, generalmente uno de cada, unidos por la interacción fuerte. Debido a que los mesones están compuestos por subpartículas de quarks, tienen un tamaño físico significativo, un diámetro de aproximadamente un femtómetro ($10^{-15}m$), que es aproximadamente 0.6 veces el tamaño de un protón o un neutrón. Todos los mesones son inestables, y el más longevo dura solo unas pocas centésimas de microsegundo. Los mesones más pesados se descomponen en mesones más livianos y, en última instancia, en electrones, neutrinos y fotones estables.[1]

Mesones K

Un kaón, también llamado mesón K y denotado k , es cualquiera de un grupo de cuatro mesones que se distinguen por un número cuántico llamado *extraeza*. En el modelo de quarks se entiende que son estados ligados de un quark strange (o antiquark) y un antiquark (o quark) up o down.

Los kaones han demostrado ser una abundante fuente de información sobre la naturaleza de las interacciones fundamentales desde su descubrimiento en los rayos cósmicos en 1947. Fueron esenciales para establecer las bases del modelo estándar de la física de partículas, como el modelo de quarks de los hadrones y la teoría de la mezcla de quarks. Los kaones han jugado un papel distinguido en nuestra comprensión de las leyes fundamentales de conservación: la violación de CP.[2]

Propiedades de los kaones

- k^- , con carga negativa (que contiene un quark strange y un antiquark up) con masa $493,677 \pm 0,013 MeV$ y vida media $(1,2380 \pm 0,0020) \times 10^{-8} s$.
- Su antipartícula, el kaón cargado positivamente K^+ (formado por un quark up y un antiquark strange), debe (debido a la invariancia CPT) tener una masa y vida media idéntica a la del K^- . Su masa difiere en $0,032 \pm 0,090 MeV$, la cual es consistente con cero. Su diferencia en vida media es de $(0,11 \pm 0,09)10^{-8} s$.
- El K^0 kaon con carga neutra (consistente en un quark down y un antiquark strange), con una masa de $497,648 \pm 0,022 MeV$. Tiene un radio cuadrático medio de carga de $-0,076 \pm 0,018 fm^2$.
- Su antipartícula (que contiene un quark strange y un antiquark down) con la misma masa.

Extrañeza (Strange) es el nombre que se le da al quinto número cuántico. Fue postulado en 1953 por M. Gell-Mann, T. Nakano y K. Nishijima. Es una propiedad de las partículas subatómicas, y sólo se aplica a las conocidas como hadrones, que incluyen protones, neutrones, piones, kaones y partículas lambda, omega y rho, entre otras. El símbolo de extrañeza es S . La extrañeza de una partícula es la suma de la extrañeza de los quarks que la componen. De los seis tipos de quarks, solo el quark extraño tiene una extrañeza distinta de cero. La extrañeza de los nucleones es cero, porque solo contienen quarks up y down y ningún quark extraño (también llamados quarks laterales).[3]

Mesones B

En el modelo estándar de física de partículas, un mesón B es un mesón que es un estado ligado de un quark bottom y cualquier otro quark de las dos primeras generaciones de fermiones (quark up, quark down, quark strange o quark charm). Por lo tanto, la clase de mesones B va junto con la de los mesones K (mesones ligeros con un quark strange) y los mesones D (mesones ligeros con un quark charm).[4]

Piones

Los piones tienen espín cero, y están compuestos por la primera generación de quarks. Un quark up y otro anti-down componen el π^+ , mientras que un quark down y otro anti-up componen el π^- , su antipartícula. La combinación up-antiup y down-antidown constituyen el π^0 , el cual es su propia antipartícula. El mesón π^\pm tiene una masa de $139.6 \text{ MeV}/c^2$ y una vida media de 2.6×10^{-8} segundos. La desintegración principal es en un muón y un neutrino.[5]

II. VIOLACION CP

La simetría CP es una composición de las simetrías C y P , dos simetrías que anteriormente se consideraban simetrías absolutas.

- La simetría C es simetría de conjugación de carga : transforma una partícula en su antipartícula o viceversa.
- La simetría P es simetría de paridad : transforma todo en su imagen especular, de modo que la izquierda se convierte en derecha y viceversa.

La mayor parte de la naturaleza parece seguir tanto la simetría C como la simetría P . Sin embargo, la fuerza débil no sigue ni la simetría C ni la P .

Debido a la fuerte asociación de los neutrinos con la fuerza débil, nunca siguen ni la simetría C ni la simetría P . Las violaciones de esas dos simetrías se descubrieron por primera vez en experimentos que involucraban a los neutrinos y su espín.[6]

La violación CP se descubrió por primera vez en los patrones de desintegración de los kaones , un grupo específico de partículas compuestas . Si la simetría CP fuera absolutamente cierta, los kaones de longitud K se desintegrarían a través de dos caminos en cantidades iguales . Sin embargo, en los experimentos, era más probable que el kaón de longitud K se desintegrara en el camino que involucra al neutrino electrónico en una fracción muy pequeña. Es esta diferencia fraccional la que demuestra una clara violación de CP y, por lo tanto, proporciona la prueba innegable de que la física distingue entre materia y antimateria[6]

En el Modelo Estándar , la violación de CP aparece como una fase compleja en la matriz de mezcla de quarks de la interacción débil. La violación directa de CP , es decir, la violación de la simetría CP en un proceso de desintegración. Debido a la simetría CPT , la violación de la simetría CP exige la violación de la simetría de inversión temporal, o simetría T [7]

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

La significancia del resultado, sigma, se encuentra dividiendo el valor de la asimetría entre su incertidumbre. Donde la significansa esta dada por:

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

por lo tanto

$$\sigma = \frac{A}{\sigma_A} \quad (3)$$

La violación de la simetría CP está bien establecida experimentalmente en el sector de los quarks y, en el Modelo Estándar (SM), se explica mediante la matriz Cabibbo-Kobayashi-Maskawa. Los decaimientos de mesones B con tres mesones cargados sin encanto en el estado final ofrecen interesantes oportunidades para buscar diferentes fuentes de violación CP , a través del estudio de la firma de estas fuentes en el diagrama de Dalitz.[8]

III. DETECTOR LHCb Y ANÁLISIS DE DATOS

El experimento Large Hadron Collider beauty (LHCb) se especializa en investigar las pequeñas diferencias entre la materia y la antimateria mediante el estudio de un tipo de partícula llamado "quark beauty." "quark b". El LHC genera una abundancia de diferentes tipos de quarks, que rápidamente decaen en otras formas. el LHCb ha desarrollado sofisticados detectores de rastreo móviles situados cerca del camino de los haces que circulan en el LHC.[9]

Los datos proporcionados por el detector LHCb corresponden al año 2011 (real_data") el cual contienen la información necesaria para llevar a cabo el estudio de la violación CP el cual se detalla a continuación.

- **B_FlightDistance:** Lo definimos como la distancia de origen de la partícula al punto donde esta se desintegra, este parametro se obtiene midiendo la distancia entre ambos vértices.
- **B_VertexChi2:** χ^2 calidad del vértice formado por las tres trayectorias cargadas.
- **H_P:** Momento de la partícula, compuesto por cada uno de sus componente H_{Px} , H_{Py} y H_{Pz} las cuales representan cada una de sus direcciones.
- **H_ProbK, H1_ProbPi:** Probabilidad de que la partícula sea un kaón [rango 0 a 1], Probabilidad de que la partícula sea un pión [rango 0 a 1], respectivamente.
- **H_Charge:** Carga de la partícula (+1 o -1). Se obtiene a partir de la dirección de curvatura de la trayectoria en el campo magnético

- **H_IPChi2** Parametro de impacto de la traza (IP) es la distancia más cercana entre las trazas del estado final y el vértice primario.
- **H_isMuon**: Identificación de la partícula como un muón, obtenida a partir de los impactos en la cámara de muones (1 verdadero, 0 falso)

IV. PRESELECCIÓN

En el LHC ocurren una gran cantidad de colisiones protón-protón. La selección de qué eventos almacenar la realiza el sistema de disparo, que busca los eventos más interesantes para guardar. Los eventos que se buscan estudiar en este análisis son relativamente raros, específicamente los procesos que se desean estudiar son conocidos como la **señal** y otros procesos que también se pueden simular la señal pero que no son necesariamente los de nuestro interés son conocidos como **fondo**. Se aplican cortes de selección en el sistema de disparo y luego de forma offline para reducir los datos. Los cortes de selección se hacen sobre las características de los eventos para maximizar el número de eventos de señal seleccionados y minimizar el número de eventos de fondo, [10].

Los principales cortes de selección que se han aplicado para seleccionar nuestra muestra de datos se muestra en Tabla I

Variable	Selección de Corte
Probabilidad de que sea muon	= 0
Prob. de ser kaon-1.5*Prob. de ser pion	> 0
Vértice a candidato B^\pm ajuste χ^2	< 10
Impacto de seguimiento (IP) χ^2	> 10

Cuadro I: Los cortes de preselección aplicados a la muestra

Al aplicar los cortes de preselección se logró filtrar 3,420,295 eventos y reducirlos a 12,273 eventos de importancia.

Se consideraron condiciones flexibles para obtener una cantidad estadísticamente significativa de eventos, sin alejarnos del objetivo principal (asegurarse que nuestros eventos sean kaones), los dos primeros cortes son respecto a la probabilidad de que sea un muón, kaon y pion. En la segunda condición, se ajustó el peso de la probabilidad de ser pion para asegurarnos de que las tres partículas resultantes fueran kaones. Para determinar el valor ideal del peso, se verificó determinando los mejores resultados de los histogramas en 2D que nos mostraban las probabilidades de que resultaran ser cualquiera de las dos partículas, como se observa en las Figura 1, Figura 2, Figura 3.

Como es posible observar en Figura 1, Figura 2, Figura 3,

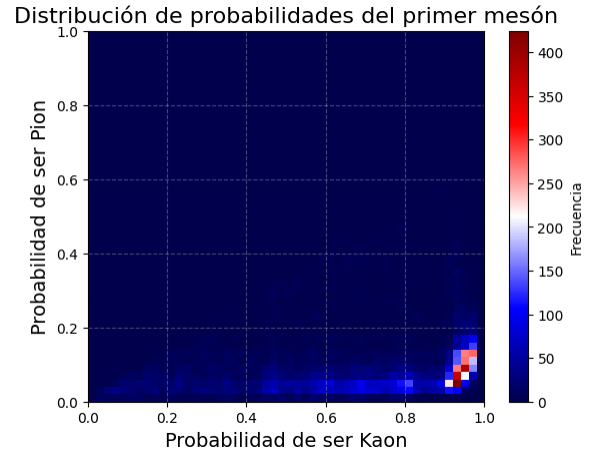


Figura 1: Distribución de probabilidades conjunta para el primer mesón

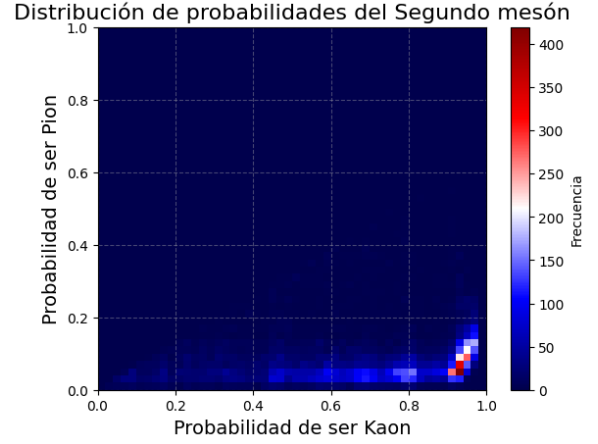


Figura 2: Distribución de probabilidades conjunta para el segundo mesón

las probabilidades se concentran en la esquina inferior derecha, lo que nos ayuda a constatar que mediante esta preselección estamos trabajando con kaones.

Para las últimas dos condiciones, buscábamos un conjunto de cortes de identificación de kaones que produzcan un gran pico de señal en la distribución de masa invariante sobre un fondo relativamente pequeño.

A. Reconstrucción de la masa invariante

Para poder graficar el pico en la distribución de masa invariante, se realizó a partir de los datos preseleccionados de cada kaón. Se calculó para cada partícula el momento P mediante la fórmula

$$P = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (4)$$

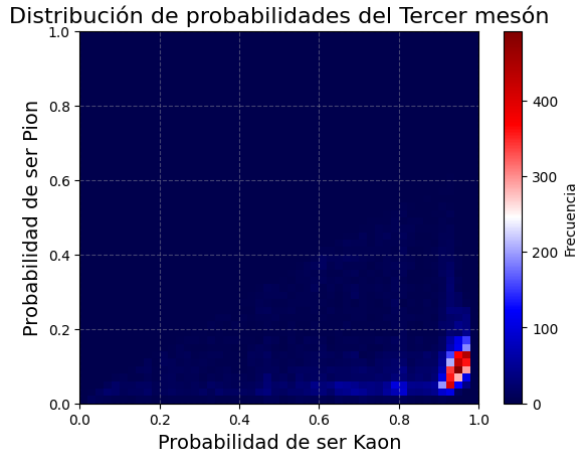


Figura 3: Distribución de probabilidades conjunta para el tercer mesón

su energía E , donde se aplicó que la masa en reposo del kaón K^\pm tuviera el valor $m = 493.677$ MeV

$$E = \sqrt{P^2 + m^2} \quad (5)$$

y su masa invariante M

$$M = \sqrt{E^2 - P^2} \quad (6)$$

y finalmente para obtener la masa invariante del mesón B^\pm , dada la conservación de la energía se sumó la contribución de energía de las tres partículas. Sin embargo, para el momentum, dado que es una cantidad vectorial, la componente del momentum del mesón B será la suma de las componentes del momento en esa dirección de los tres kaones $pi_B = pi_{K_1} + pi_{K_2} + pi_{K_3}$, con $i = x, y, z$.

Apartir del cálculo de la masa invariante se realizó un histograma (como se observa en Figura 4) con los datos reales posteriores a aplicar la preselección indicada. En Figura 4 vemos que el la masa invariante tiene un comportamiento gaussiano, cuyo pico está entre 5250 - 5300 MeV/c^2 y comparándolo con el histograma de la masa invariante de los datos simulados (Figura 5) verificamos que el pico se encuentra en el rango esperado, que según [11] el valor del mesón B^\pm en promedio es 5279.25 ± 0.26

Al comparar ambos histogramas de la masa invariante con los datos reales (Figura 4) y con los datos simulados (Figura 5), observamos diferencias notorias. En los datos simulados, el pico es mucho más prominente y estrecho, lo cual refleja una señal limpia y pura sin ruido de fondo. En cambio, en los datos reales, el pico es más ancho y menos definido, con contribuciones de fondo evidentes en la región entre $5050 - 5175$ MeV/c^2 .

Esto puede deberse a efectos experimentales como la resolución limitada del detector, fluctuaciones estadísticas y la presencia de eventos combinatorios o

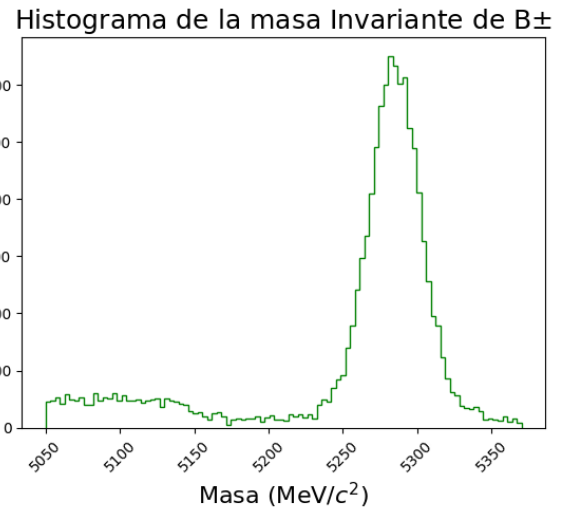


Figura 4: Histograma de la masa invariante del mesón B^\pm

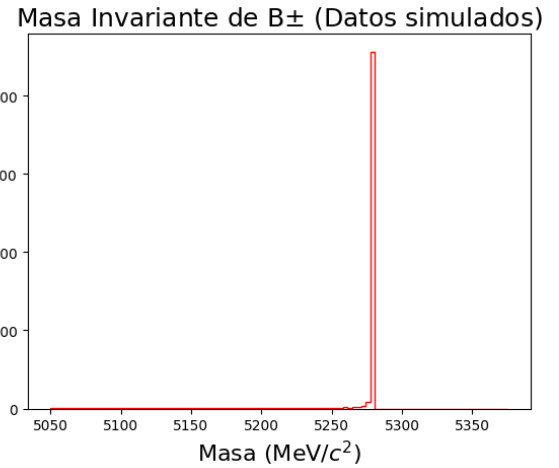


Figura 5: Histograma de la masa invariante del mesón B^\pm a partir de los datos simulados

resonancias adicionales. La señal de fondo, que no está presente en los datos simulados, resalta la necesidad de aplicar técnicas de limpieza de datos en análisis posteriores, a fin de aislar de manera más precisa la señal de B^\pm .

B. Cálculo de asimetría através de Dalitz plot (nivel global)

Al hablar de nivel global, implica que estamos realizando nuestro análisis através de todos los rangos de energía y momento de los kaones en los que los mesones B se han desintegrado.

Para determinar las asimetrías globales de CP, las

asimetrías brutas medidas a partir de los ajustes se corrigen por los efectos inducidos por la eficiencia del detector, las interacciones de las partículas del estado final con la materia y cualquier asimetría en las tasas de producción hacia adelante entre los mesones B^+ y B^- . La asimetría bruta, A_{raw} , se expresa en términos de los rendimientos de eventos de B^+ y B^- , [8]. Somos capaces de determinar si un evento procedía de B^+ o B^- dada que la carga es una cantidad conservada, así que la suma del mesón B será igual a la suma de la carga de las partículas en la cual decae.

$$A_{raw} \equiv \frac{N_{B^-} - N_{B^+}}{N_{B^-} + N_{B^+}} \quad (7)$$

La significancia del resultado, sigma, se encuentra dividiendo el valor de la asimetría entre su incertidumbre.

$$\sigma = \frac{A}{\sigma_A} \quad (8)$$

Donde la incertidumbre estadística esta dada por:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1 - A^2}{N^- + N^+}} \quad (9)$$

En la Tabla II se muestran los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones anteriores a los datos resultantes de la preselección.

Resultado	Valor
No. de eventos de B^+	6361
No. de eventos de B^-	5912
Asimetría	-0.03658
Incertidumbre estadística	0.00902
Significancia	-4.06

Cuadro II: En la tabla se muestran los resultados de los datos al aplicar la preselección

Al comparar los valores de la asimetría y la incertidumbre estadística con los del artículo [8], determinamos que se obtienen valores muy cercanos, lo que nos permite corroborar que los cortes elegidos en nuestra preselección son adecuados y que nuestros calculos son correctos, sin embargo, aún se debe limpiar la muestra para obtener mejores resultados.

1. Estudio de la resonancia de dos cuerpos a través de Dalitz plot

La desintegración del mesón B puede ocurrir directamente del estado final de tres cuerpos o a través de una partícula intermedia. Por ejemplo, $B^+ \rightarrow K^+ K^+ K^-$ podría ocurrir a través de la desintegración $B^+ \rightarrow K^+ R^0$, donde R^0 es una resonancia de partícula neutral que puede desintegrarse en $R^0 \rightarrow K^+ K^-$. Los diagramas de Dalitz se pueden usar para identificar estas resonancias,

que son visibles como bandas en el diagrama Dalitz, [12].

La cinemática de una desintegración de tres cuerpos puede ser completamente descrita utilizando solo dos variables. Las energías y momentos de los tres kaones no son independientes entre sí, ya que todos provienen de la desintegración de un mesón B y la energía y el momento se conservan, [12].

Consideremos nuestra desintegración $B^+ \rightarrow K_1^+ K_2^+ K_3^-$ donde hemos numerado los kaones como 1,2,3 para diferenciarlos. Podemos calcular la masa invariante de tres combinaciones posibles que podrías corresponder a resonancias intermedias $R_1^+ \rightarrow K_1^+ K_2^+$, $R_2^0 \rightarrow K_1^+ K_3^-$, y $R_3^0 \rightarrow K_2^+ K_3^-$. La posible resonancia R_1^+ sería una resonancia doblemente cargada. No esperaríamos ver ninguna resonancia correspondiente a esta, ya que los mesones están compuestos por un quark y un anti-quark, y sus cargas no pueden sumar dos unidades. Las posibles resonancias R_2^0 , R_3^0 corresponden a configuraciones en las que podríamos ver resonancias. Por lo tanto, debes calcular las combinaciones de masas invariante para estas. El cuadrado de estas masas debe ser utilizado como las variables de Dalitz, [12].

En Figura 6 vemos el histograma donde se representa la masa invariante al cuadrado de las resonancias que se pueden producir en el mesón B^+ .

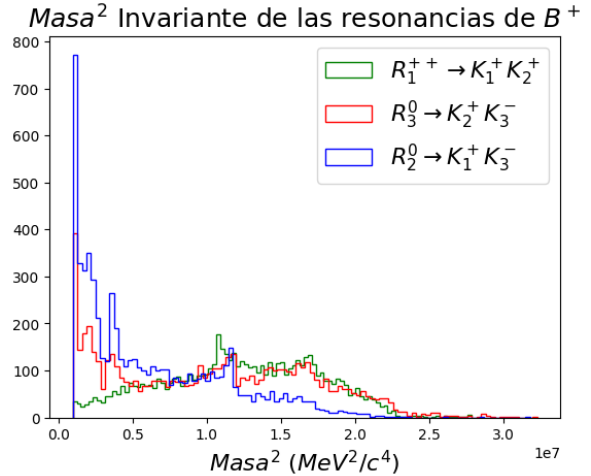


Figura 6: Masa invariante al cuadrado de las resonancias del mesón B^+

Las resonancias intermedias que se pueden producir en el mesón B^- , serían $R_1^+ \rightarrow K_2^- K_3^-$, $R_2^0 \rightarrow K_1^+ K_3^-$, $R_3^0 \rightarrow K_1^+ K_2^-$. En la Figura 7 se presenta un histograma para visualizar el comportamiento de la masa invariante al cuadrado de estos mesones.

Es útil estudiar las resonancias a través del Dalitz plot ya que es una representación visual del espacio de fases de una desintegración de tres cuerpos. Se llama así en

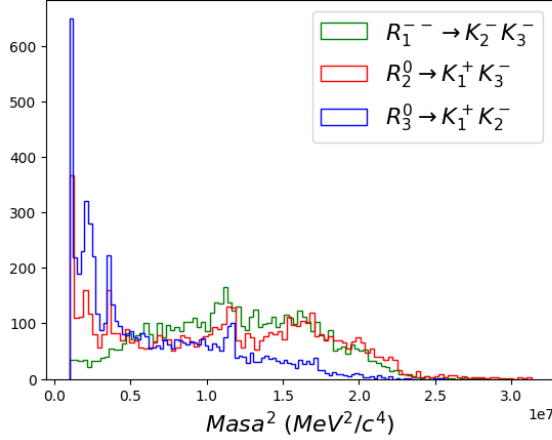
Masa² Invariante de las resonancias de B^- 

Figura 7: Masa invariante al cuadrado de las resonancias del mesón B^-

honor a su inventor, Richard Dalitz (1925–2006), [12].

Si no hay resonancias intermedias en la desintegración de tres cuerpos que se está analizando, el diagrama igualmente se vería uniformemente distribuido con eventos dentro de sus límites físicos, [12]. Si hay resonancias intermedias, estas aparecen como bandas en el diagrama, con una mayor densidad de eventos.

Tomemos el caso donde $B^+ \rightarrow K^+ R^0$, donde R^0 es una partícula neutral de resonancia que puede desintegrarse en $R^0 \rightarrow K^+ K^-$. Observaríamos una banda de eventos aumentada a lo largo del diagrama de Dalitz en una masa correspondiente a la de la partícula R^0 . Las partículas también tienen una propiedad cuántica llamada espín. Si R^0 tiene espín 0, entonces observaremos una banda continua de eventos a través del diagrama. Si R^0 tiene espín 1, la banda tendrá un mínimo, y para partículas con espín 2, tendrá dos mínimos, [12].

Cada una de estas masas corresponde a las masas representada en la Figura 8 de una quasi-partícula (como el R^0 mencionado anteriormente). Es la masa invariante de dos partículas del estado final combinadas. Si llamamos a las partículas del estado final 1, 2, 3, estas masas pueden escribirse como m_{12} y m_{23} . Estas masas están limitadas en los valores que pueden tomar, ya que existen masas máximas y mínimas posibles que definen los límites del diagrama, debido a que la energía y el momento se conservan. Los límites del diagrama se muestran en Figura 8, donde M es la masa de la partícula original (en este caso, el mesón B) que se desintegra en las tres partículas del estado final (en este caso, los kaones).

En la Figura 9 se muestra el gráfico Dalitz correspondiente a las masas invariantes al cuadrado de las resonancias de B^+ . Dado que la resonancia R_1^+ es muy

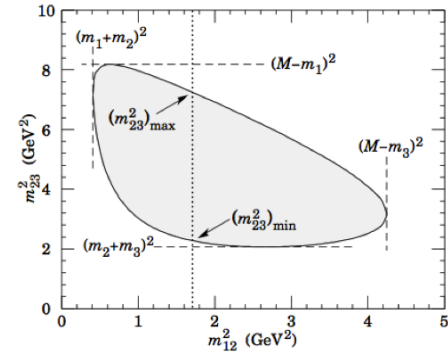


Figura 8: Explicación teórica de lo que se representa un Dalitz plot. (image credit: particle data group)

poco probable, el gráfico está sobre las resonancias R_2^0 y R_3^0 , que son de mayor interés para nosotros, vemos que no se tiene una distribución tan uniforme como Figura 10, y esto puede atribuirse a la mucho menor cantidad de datos disponibles en esta muestra. Sin embargo, es posible visualizar que tiene la forma esperada limitada por los valores de sus masas involucradas, así como se presenta en la Figura 8.

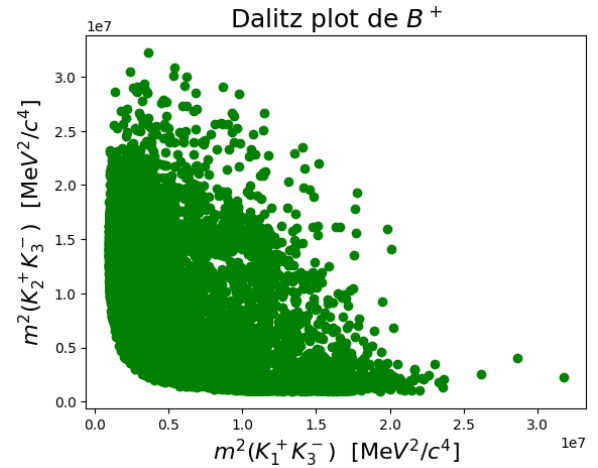


Figura 9: Dalitz plot de la distribución $B^+ \rightarrow K_1^+ K_2^+ K_3^-$

En la Figura 11, se visualiza el Dalitz plot sobre las masas de las resonancias R_3^0 y R_2^0 , ya que son de mayor interés para este análisis. Su distribución tampoco es uniforme como se esperaría, debido a la menor cantidad de datos en la muestra. Sin embargo es posible comprobar que su forma está limitada por la del valor de la masa según corresponde al par de mesones.

Como se mencionó anteriormente las resonancias R_2^0 y R_3^0 son de mayor interés ya que están compuestas por los mismos tipos de partículas $K^+ K^-$ lo cual implica que tienen distribuciones idénticas. Por lo tanto para poder

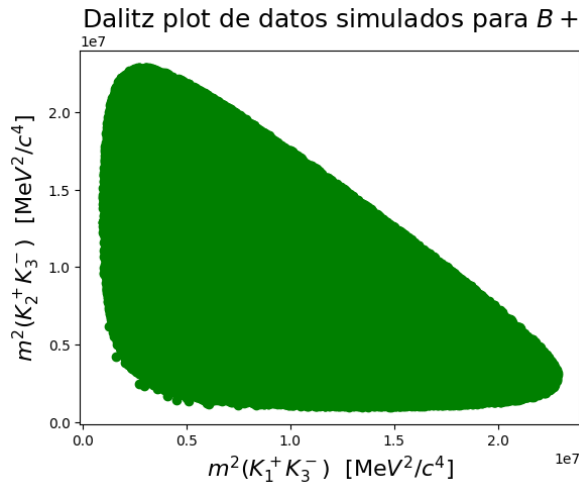


Figura 10: Distribución de Dalitz plot de $B^+ \rightarrow K_1^+ K_2^+ K_3^-$ apartir de los datos simulados

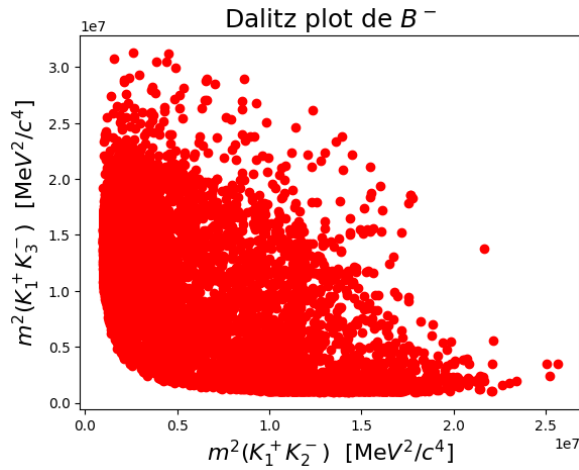


Figura 11: Distribución de Dalitz plot de $B^- \rightarrow K_1^+ K_2^+ K_3^-$

distinguir las resonancias se establece un orden, para las resonancias con la masa más baja R_{Low}^0 y para las resonancias correspondiente a la combinación de kaones con la masa más alta.

Para visualizar mejor lo anterior en la Figura 12 se realizó un histograma en 2D, graficando las masas al cuadrado de R_{Low}^0 y R_{High}^0 . Se superpusieron las gráficas Dalitz de las resonancias de B^+ y B^- para notar mejor las acumulaciones donde ocurren las resonancias.

Apartir de la Figura 12 se visualizaron ciertas concentraciones, por lo tanto concluimos que tenemos ciertas resonancias en R_{Low}^0 [1800,1900] MeV y para R_{High}^0 en el intervalo [3400,3450] MeV. Al eliminar estas concentraciones, obtuvimos la Figura 13, en donde se

Dalitz plot de B^\pm incluyendo resonancias

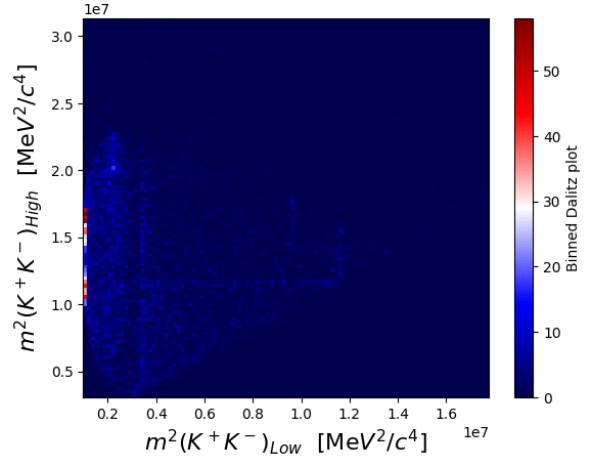


Figura 12: Distribución de Dalitz plot de $B^\pm \rightarrow K^\pm K^+ K^-$, donde el eje x representa a las resonancias con las masas invariantes al cuadrado más bajas (R_{Low}^0), y en el eje y está representado de masa invariante al cuadrado más altas de las combinaciones de los kaones (R_{High}^0).

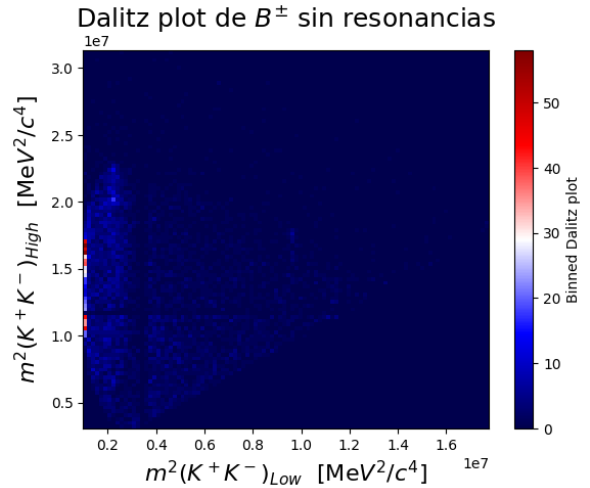


Figura 13: Distribución de Dalitz plot de $B^\pm \rightarrow K^\pm K^+ K^-$. Los huecos corresponderían a la exclusión de sus respectivas resonancias

muestran ciertos vacíos que representan precesisamente la exclusión de de las resonancias. Apartir de esos rangos pudimos identificar a las partículas que corresponden, entonces la partícula por su masa que corresponde a la resonancia generada en R_{Low}^0 [1800,1900] MeV es D^0 , con una masa igual a 1864.84 ± 0.05 MeV.

La partícula que corresponde a la resonancia generada en R_{High}^0 en el intervalo [3400,3450] MeV², es $\chi_{c0}(1P)$, cuya masa es igual a 3414.75 ± 0.31 MeV

C. Cálculo de asimetría através de Dalitz plot (nivel local)

Podemos calcular la asimetría en un nivel local, en cuya región la diferencia entre el mesón B^+ y el mesón B^- sean más significativas.

Dicha región se puede encontrar usando nuevamente Daliz Plots.

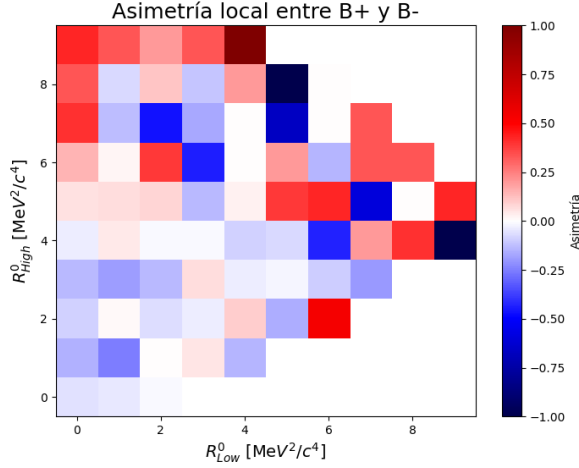


Figura 14: En esta gráfica se muestra la asimetría local, calculada para cada bin, entre los mesones B^+ y B^- después de haber eliminado las resonancias respectivas.

Podemos calcular, através de la Ecuación 8 la incertidumbre por cada bin de la asimetría local entre los mesones B^+ y B^- , el cual es mostrado en la Figura 15.

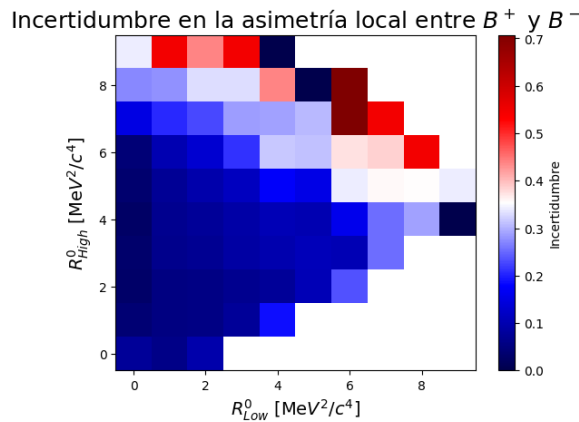


Figura 15: Incertidumbre estadística de la asimetría local, calculada para cada bin, entre los mesones B^+ y B^- después de haber eliminado las resonancias específicas.

Se determina, através de la Ecuación 9 la significancia por cada bin de la asimetría local entre los mesones B^+ y B^- , el cual es mostrado en la Figura 16.

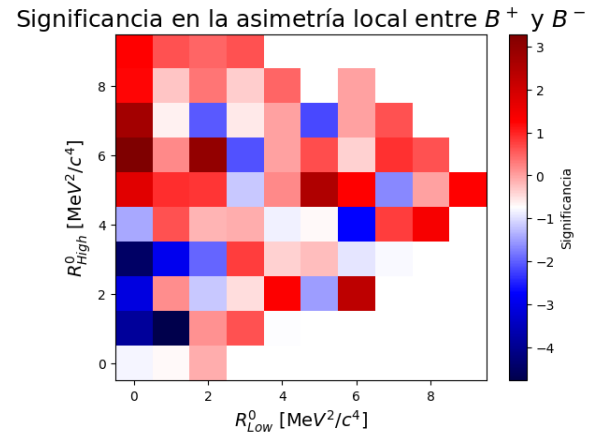


Figura 16: Significancia estadística de la asimetría local, calculada para cada bin, entre los mesones B^+ y B^- después de haber eliminado las resonancias específicas.

En el cálculo de la asimetría global, se determino que la asimetría era negativa, por lo tanto nos centraremos en la esquina inferior izquierda del gráfico, donde se encuentra la mayor distribución de significancia con valores negativos representados en color azul, en la Figura 16.

En la Figura 17, se muestra el histograma de la masa invariante producida por B^+ . En color rojo es la calculada en todo el rango, exceptuando las resonancias, mientras que el de color verde es centrandonos en el área de mayor significancia que obtuvimos en la Figura 16.

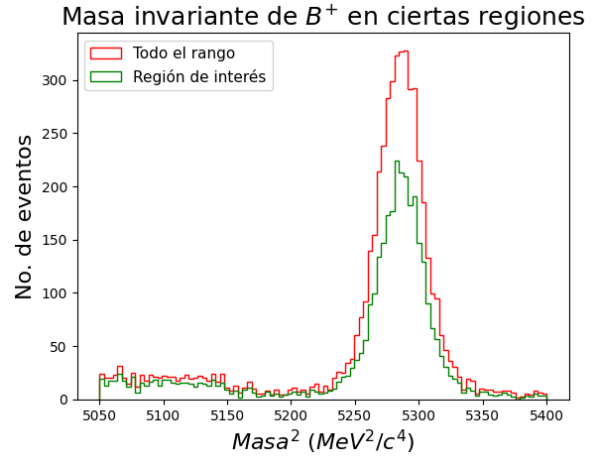


Figura 17: Histograma de la masa invariante de B^+ . El rojo abarca todo el rango, exceptuando las resonancias, mientras que el verde corresponde a la región donde R_{Low}^0 es menor que $1800^2 \text{ MeV}^2/c^4$ (o $3.24 \text{ GeV}^2/c^2$) y R_{High}^0 está fuera del intervalo $[2000^2, 3800^2] \text{ MeV}^2/c^4$ (o $[4.00, 14.44] \text{ GeV}^2/c^2$)

En la Figura 18, se muestra el histograma de la masa invariante pero para B^- . En color rojo es la calculada en todo el rango, exceptuando las resonancias, mientras que el de color verde es centrandonos en el área de mayor significancia que obtuvimos en la Figura 16.

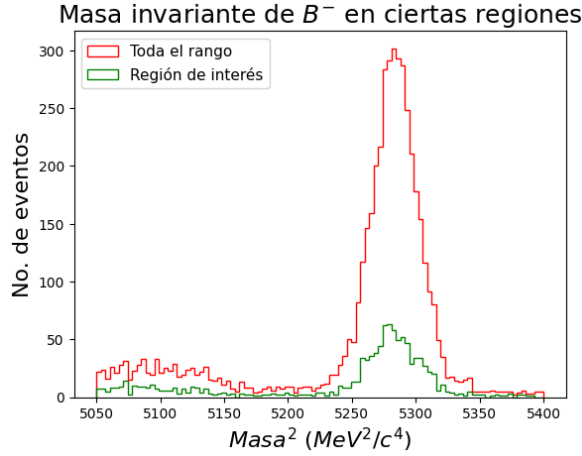


Figura 18: Histograma de la masa invariante de B^- . El histograma de color rojo abarca todo el rango, exceptuando las resonancias, mientras que el de color verde corresponde a la región donde R_{Low}^0 es menor que 1800^2 MeV^2 (o 3.24 GeV^2) y R_{High}^0 está fuera del intervalo $[2000^2, 3400^2] \text{ MeV}^2$ (o $[4.00, 11.56] \text{ GeV}^2$)

Notemos que para regiones locales la asimetría puede ser muy significativa.

V. ANÁLISIS DE SEÑAL Y SEPARACIÓN DEL FONDO

Habiendo limpiado nuestra muestra de las resonancias, pasaremos al análisis de la señal y el fondo, ya que el histograma realizado aún tiene una combinación de la señal y el fondo. Para poder extraer la cantidad correcta de candidatos de señal debemos aplicar ciertos ajustes para modelar la señal y el fondo.

En la Figura 19 se muestra el histograma de la masa invariante sin las resonancias de B^- . La señal gaussiana es el pico dominante centrado en $\mu = 5283.58 \text{ MeV}/c^2$ correspondiente a la masa invariante del mesón B^- . El valor de $\sigma = 18.33$ indica que la señal está bien definida y presenta un ancho estrecho, consistente con una resolución experimental alta. El ajuste lineal modela contribuciones de ruido que se distribuyen de manera aproximadamente constante en la región inferior y superior de la gráfica. La pendiente negativa del ajuste lineal $\alpha = -0.05$ sugiere que el fondo disminuye levemente con valores crecientes de masa. El ajuste sigmoide modela un aumento suave del fondo en la región de baja masa invariante, donde suelen acumularse eventos no resonantes o efectos cinemáticos. La superposición del

ajuste combinado (línea azul) con el histograma muestra una buena correspondencia con los datos experimentales. Este ajuste permite separar y distinguir claramente la señal de interés (pico gaussiano) del fondo (lineal + sigmoide).

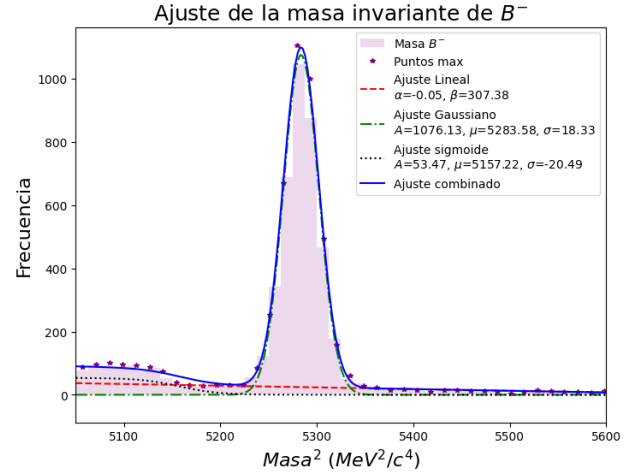


Figura 19: Distribución de la masa invariante sin las resonancias producidas en B^- . Se han realizado ajustes a los datos utilizando las funciones lineal, gaussiana y sigmoide. La línea azul representa el ajuste combinado, el cual resulta de la suma de los tres ajustes individuales.

De forma análoga en la Figura 20 se muestra el histograma de la masa invariante sin las resonancias de B^+ . La señal gaussiana es el pico dominante centrado en $\mu = 5285.43 \text{ MeV}/c^2$ correspondiente a la masa invariante del mesón B^- . El valor de $\sigma = 18.03$ indica que la señal está bien definida y presenta un ancho estrecho, consistente con una resolución experimental alta. El ajuste lineal modela contribuciones de ruido que se distribuyen de manera aproximadamente constante en la región inferior y superior de la gráfica. La pendiente negativa del ajuste lineal $\alpha = -0.06$ sugiere que el fondo disminuye levemente con valores crecientes de masa. El ajuste sigmoide modela un aumento suave del fondo en la región de baja masa invariante, donde suelen acumularse eventos no resonantes o efectos cinemáticos. La superposición del ajuste combinado (línea azul) con el histograma muestra una buena correspondencia con los datos experimentales. Este ajuste permite separar y distinguir claramente la señal de interés (pico gaussiano) del fondo (lineal + sigmoide).

Finalmente, con todos los pasos anteriores de eliminar resonancias, tomando áreas de mayor interés y realizando un ajuste sobre los datos de la señal y el fondo, llegamos al valor de la asimetría, incertidumbre estadística y significancia.

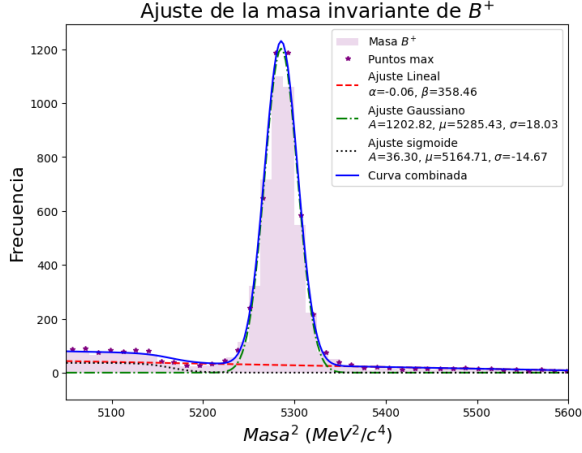


Figura 20: Distribución de la masa invariante sin las resonancias producidas en B^+ . Se han realizado ajustes a los datos utilizando las funciones lineal, gaussiana y sigmoide. La línea azul representa el ajuste combinado, el cual resulta de la suma de los tres ajustes individuales.

Resultado	Valor
Asimetría	-0.0474
Incertidumbre estadística	0.0146
Significancia	-3.24

Cuadro III: En la tabla se muestran los resultados después de todos los análisis.

VI. INCERTEZAS SISTEMÁTICAS Y RESULTADOS

Realizamos el mismo análisis que en la sección anterior, solo que en vez del ajuste gaussiano y sigmoide aplicamos el ajuste de crystal ball y el lorentziano, esto es con la finalidad de obtener la incerteza sistemática, entonces en las Figura 21 y Figura 22 se muestran el comportamiento de estas aplicado al histograma de la masa invariante del mesón B^- y B^+ , respectivamente.

Finalmente obtuvimos una incerteza sistemática de

$$\sigma_s = -0.003$$

VII. CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos del detector LHCb, se llevó a cabo un análisis detallado con el objetivo de estudiar la violación de simetría carga-paridad (CP) en los decaimientos de mesones B^\pm . Inicialmente, se trabajó con un conjunto de datos preseleccionados, a los cuales se les aplicaron una serie de cortes específicos con el fin de asegurar que los eventos seleccionados correspondieran a las partículas de interés, minimizando así la contribución de procesos de fondo no deseados.

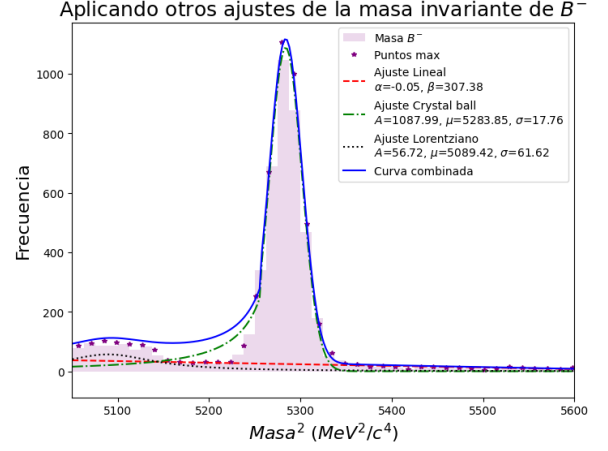


Figura 21: Distribución de la masa invariante sin las resonancias producidas en B^- . Se han realizado otro tipo de ajustes a los datos como las funciones crystal ball y lorentziana. La línea azul representa el ajuste combinado, el cual resulta de la suma de los tres ajustes individuales.

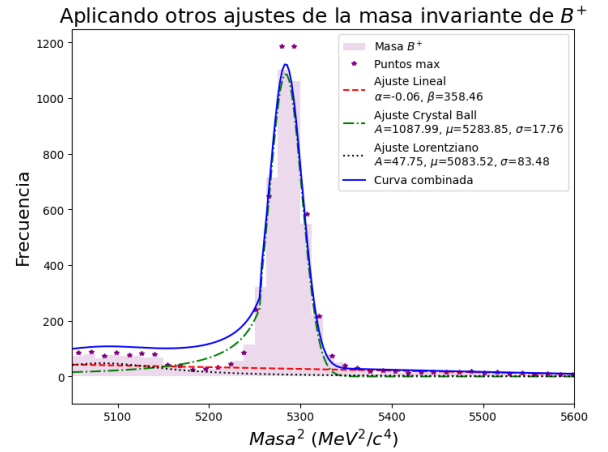


Figura 22: Distribución de la masa invariante sin las resonancias producidas en B^+ . Se han realizado otro tipo de ajustes a los datos como las funciones crystal ball y lorentziana. La línea azul representa el ajuste combinado, el cual resulta de la suma de los tres ajustes individuales.

Una vez seleccionados los eventos de interés, se procedió a realizar un análisis utilizando diagramas de Dalitz. Este tipo de gráfico permitió identificar y eliminar las resonancias intermedias producidas en los decaimientos de los mesones B^\pm , las cuales podrían afectar la precisión de la medición al introducir estructuras adicionales en los datos. La eliminación de estas resonancias fue crucial para obtener un conjunto de datos limpio, libre de contribuciones espurias que pudieran sesgar el análisis de la violación CP.

Tras la limpieza de la muestra de eventos, se realizaron ajustes sobre el histograma de masas invariante para separar de manera efectiva la señal del fondo. Para esto, se implementaron técnicas estadísticas avanzadas que permitieron discriminar entre los eventos de señal (los que corresponden al proceso de interés) y los eventos de fondo, que corresponden a procesos no relacionados o secundarios. Además, se aplicaron diversos procedimientos para calcular la incertidumbre sistemática asociada al análisis, garantizando que las posibles fuentes de error fueran correctamente identificadas y cuantificadas.

Como resultado de este exhaustivo análisis, se obtuvo el siguiente valor para la asimetría CP:

$$A_{cp} = -0.047 \pm 0.014(stat) \pm 0.003(sys)$$

Este resultado proporciona una estimación precisa de la violación CP en los decaimientos de los mesones B^\pm , con una incertidumbre estadística de ± 0.014 y una incertidumbre sistemática de ± 0.003 . Los resultados obtenidos son consistentes con las expectativas teóricas y ofrecen una contribución significativa al entendimiento de la violación de simetría en los procesos de decaimiento de mesones, lo que sigue siendo un área clave de investigación en física de partículas.

VIII. APÉNDICE

A continuación se presenta un hipervínculo que lleva al código implementado para este trabajo:

https://drive.google.com/file/d/1U6a0M-07QFFi7cDbGIkGGc_kIJ42EG6V/view?usp=sharing

-
- [1] Academia Lab. (2024). Mesón. Enciclopedia. Revisado el 14 de diciembre del 2024. <https://academia-lab.com/enciclopedia/meson/>
 - [2] Academia Lab. (2024). Kaón. Enciclopedia. Revisado el 13 de diciembre del 2024. <https://academia-lab.com/enciclopedia/kaon/>
 - [3] (S/f). Duke.edu. Recuperado el 14 de diciembre de 2024, de <https://webhome.phy.duke.edu/~kolena/modern/strange.html>
 - [4] Villatoro, F. R. (2017, junio 9). La anomalía de los mesones B en la revista Nature. La Ciencia de la Mula Francis. <https://francis.naukas.com/2017/06/09/la-anomalia-de-los-mesones-b-en-la-revista-nature/>
 - [5] (S/f-b). Quimica.es. Recuperado el 15 de diciembre de 2024, de <https://www.quimica.es/enciclopedia/Piñon.html>
 - [6] (S/f). Columbia.edu. Recuperado el 15 de diciembre de 2024, de <https://www.nevis.columbia.edu/daedalus/motiv/cp.html>
 - [7] Wikipedia contributors. (s/f). Baryon asymmetry. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.m.wikipedia.org/wiki/Baryon_asymmetry
 - [8] R. Aaij et al. Measurements of CP violation in the three-body phase space of charmless B^\pm decays. American Physical Society.
 - [9] LHCb. (s/f). CERN. Recuperado el 17 de diciembre de 2024, de <https://home.cern/science/experiments/lhcb>
 - [10] LHCb Open Data Project PWF. (s/f). Data Selection Cuts. Recuperado el 18 de diciembre de 2024, de notebooks/Background-Information-Notebooks/DalitzPlots.ipynb
 - [11] K.A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C38, 090001 (2014). Recuperado el 18 de diciembre de 2024, de <http://pdg.lbl.gov>
 - [12] LHCb Open Data Project PWF. (s/f). Dalitz Plot. Recuperado el 18 de diciembre de 2024, de notebooks/Background-Information-Notebooks/DalitzPlots.ipynb