Física Numérica

Tarea #6

D. A. Vázquez Gutiérrez

Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional,Unidad Profesional .^Adolfo López Mateos", Zacatenco, Edificio 9, Col. San Pedro Zacatenco, C.P. 07730 del. Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México

email: dvazquezg1600@alumno.ipn.mx

19 de junio de 2024

1. Identificar partículas.

El objetivo de este ejercicio es estimar la masa de una partícula que decae en dos muones. Lo datos son reales tomados del CMS (*Compact Muon Solenoid*) que han sido adquiridos, analizados, filtrados e identificados como colisiones en el LHC (*Large Hadron Collider*) y que presentan un par muón-antimuón, conocidos usualmente como dimuones, seleccionados para obtener eventos que son candidatos para observar partículas $J/\phi, Y, W$ y Z. En el archivo adjunto $Jpsimumu_Run2011A.csv$ se presentan los datos de poco más de 31 000 colisiones. Las columnas en la tabla corresponden a:

- *Run*: Los datos recogidos por el CMS en una año dado dividido en conjuntos llamados 'corridas' (*Runs*). Por ejemplo, los datos de 2011 se dividieron en*RunA*y *RunB*. Run es una colección de datos de un periodo con una duración variable.
- *Event*: Es una colisión protón- protón.
- $Type1$: G= dimuón global, T= dimuón trazador (observado sólo en el rastreador)
- $E1$: Energía del dimuón 1.
- $px1$:Momento en la dirección del eje x del dimuón número 1.
- $px1$:Momento en la dirección del eje y del dimuón número 1.
- $px1$:Momento en la dirección del eje z del dimuón número 1.
- $pt1$:Momento transversal muón número 1.
- $eta1$:En física experimental de partículas, la pseudorapidez η se utiliza comúnmente como coordenada espacial describiendo el ángulo de una partícula relativa al eje del haz definida por:
$$\eta = -In\Big[tan\Big(\frac{\theta}{2}\Big)\Big] \tag{1}$$
con θ el ángulo entre el momento p de la partícula y la dirección positivadel eje del haz.
- $phi1$:Es el ángulo azimutal ϕ, medido desde el eje x positivo en el plano xy.
- $Q1$: Carga del muón número 1.
- $Type2$: G= dimuón global, T= dimuón trazador (observado sólo en el rastreador).
- $E2$: Energía del dimuón número 2.

- $px2$:Momento en la dirección del eje x del dimuón número 2.
- $px2$:Momento en la dirección del eje y del dimuón número 2.
- $px2$:Momento en la dirección del eje z del dimuón número 2.
- $pt2$: Momento transversal del muón número 2.
- $eta2$: La pseudorapidez $\eta 2$ del muón número 2.
- $phi2$: Es el ángulo azimutal, medido desde el eje x positivo en el plano xy, del muón número 2.
- $Q2$: Carga del dimuón número 2

1.1. Masa de partículas

Para cada colisión, calcule la masa de la partícula que decae(que podrían ser partículas $J/\phi, Y, W$ y Z) ,utilizando sus conocimientos de Dinámica relativista. Considere unidades con $c = 1$ para simplificar los cálculos.

Entonces, consideramos que para una sola partícula , el cuadrivector energía-momento $(E, \overrightarrow{p})$, se define como:

$$P = (E, \overrightarrow{p}) \tag{2}$$

Cuando colocamos este vector en el espacio de Minkowski , con la pseudo norma :

$$m^2 = E^2 - |\overrightarrow{p}|^2 \tag{3}$$

Entonces, cual, en este caso , el segundo sistema consiste en dos partículas, entonces, cada uno de ellos tiene un vector P_1 y P_2. Donde entonces el cuadrivector total es :

$$\begin{aligned} P_{total} = P_1 + P_2 &= (E_1 + E_2, \overrightarrow{p_1} + \overrightarrow{p_2}) \\ &= (E_{total}, p_{total}) \end{aligned} \tag{4}$$

Donde entonces , empleando las ecuaciones (3) y (4), entonces:

$$m_{invariante} = \sqrt{E_{total}^2 - |\overrightarrow{p}_{total}|^2} \tag{5}$$

1.2. Histograma

Con la masas calculadas en el inciso anterior, elabore un histograma de frecuencias. Es importante notar que debe de definir clases (bins) para poder establecer las frecuencias. Poco más de100 clases debe ser suficiente. Escribimos el programa 3 que se encuentra en el Apéndice A.1, donde conseguimos el histograma el cual es presentado mas adelante, en este se presenta la masa invariante de los decaimientos , así como también el numero de eventos que produjo una masa similar.

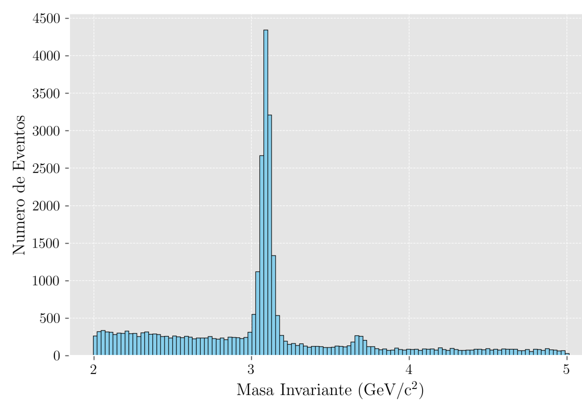

Figura 1: **Histograma de masa de particulas decaidas en dimuones**. Contruida apartir de los datos del archivo $Jpsimumu_Run2011A.csv$, podemos notar un gran pico cerca del centro y uno pequeño al costado derecho de este, de una altura similar a la constante de lado izquierdo del pico principal

1.3. Analizando datos

A partir del histograma de la figura 1, podemos notar que, aun que en apariencia contante , entre la masa de 2 y 3 GeV/c^2 hay algunas pequemas fluctuaciones, este estado constate es igual o mayor a un pequeño pico que se encuentra alrededor del valor 3,7GeV/c^2 .

Entonces, consideraremos los picos previos a 3,7GeV/c^2 y los demás los consideraremos como ruido. Para encontrar estos picos , y sus respectivas masas , haremos una modificación al $Codigo1$:

```python

#---Encontrar picos  de la grafica------

max_masa_invariante = data['masa_invariante'].max()
min_masa_invariante = data['masa_invariante'].min()

# Histograma de las masas invariantes
counts, bin_edges = np.histogram(data['masa_invariante'], bins=120, range=(min_masa_invariante , max_masa_invariante))
# Encuentra la parte central "el valor que supondremos " de cada "bin"
bin_centers = (bin_edges[:-1] + bin_edges[1:]) / 2


#Creacion de curva simulada por cubic Slines
cs=CubicSpline(bin_centers, counts)
N=10000
x_test=np.linspace(min_masa_invariante, max_masa_invariante,N)
y_test=cs(x_test)

#Ahora queremos escoger como altura minima para los picos , el pico mas pequeno previo a el pico maximo de todo el histograma

# Encontrar los indices de los picos
indices_picos = find_peaks(y_test, height=0)[0]  #La funcion de pandas , find_peaks, encuentra automaticamente los picos
print(indices_picos)

# Encontrar el indice del bin con el maximo numero de repeticiones
indice_bin_max_repeticiones = np.argmax(y_test)
print(indice_bin_max_repeticiones ,y_test[indice_bin_max_repeticiones],x_test[indice_bin_max_repeticiones])

# Filtrar los picos previos al bin con el maximo numero de repeticiones
indices_picos_previos = indices_picos[indices_picos < indice_bin_max_repeticiones]

# Encontrar el valor minimo de repeticiones entre los picos previos
valor_min_repeticiones_previos = np.min(y_test[indices_picos_previos])


# Detectar picos
peaks, _ = find_peaks(y_test, height=valor_min_repeticiones_previos)
```

Código 1: Fragmento de programa que encuentra los picos con mayor frecuencia en el histograma del primer programa . NOMBRE : "6.1.2 Masa.py"

De esta forma , conseguimos el nuevo histograma de la figura 2, así como el cuadro 1, donde en función de la masa, y de los datos del Particle Data Group, podemos encontrar que algunas de los picos de masas encontradas corresponden con algunas particulas, con un cierto error relativo.

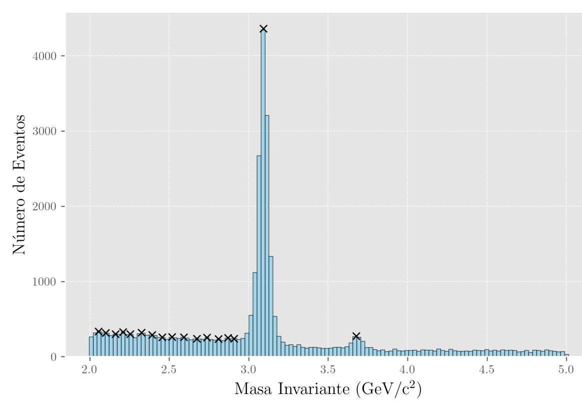

Figura 2: **Histograma de masa de particulas decaidas en dimuones con picos marcados**.

Cabe recalcar que hasta este punto , unicamente se pidió que se comparara la masa de los posibles picos con la de partículas de los datos del Particle Data Group, como se ve en el cuadro 1, sin embargo , los dos picos mas marcados , $J/\psi(3096)$ y $\psi(3686)$ son en realidad las únicas que presentan un decaimiento de partículas muón-anti-muón mediante los datos vistos en el Particle Data Group.

Unas excelentes preguntas entonces serian , ¿A que se debe exactamente el cambio de ruido de fondo? y ¿Como podemos considerar apropiadamente el ruido de fondo en este tipo de mediciones?

Masa (GeV/c²)	Posible partícula	Masa real (GeV/c²)	E_r (%)
2.0549	$f_4(2050)$	2.050	0.439
2.1002	$D_s^+(2112)$	2.1122	0.57
2.1621	$\phi(2170)$	2.17	0.3641
2.2094	$\Lambda_c^+(2286)$	2.28646	3.36
2.2544	$\Lambda_c^+(2286)$	2.28646	1.436
2.3251	$D_{s0}^*(2317)$	2.317	0.3496
2.3921	$\Xi_c^+(2467)$	2.46787	3.07
2.4560	$\Sigma_c^0(2455)/\Xi_c^+(2467)$	2.45402/2.46787	0.08/ 0.48
2.5182	$D_{s1}(2536)$	2.536	0.7019
2.5922	$D_{s1}(2573)$	2.573	0.7462
2.6743	$\Omega_c^0(2695)$	2.6952	0.78
2.7377	$D_{s1}^*(2700)$	2.7	1.396
2.8098	$D_{s3}^*(2860)$	2.86	1.755
2.8699	$D_{s3}^*(2860)$	2.86	0.346
2.9067	$\eta_c(2984)$	2.9841	2.594
3.0923	$J/\psi(3096)$	3.0969	0.15
3.6773	$\psi(3686)$	3.68609	0.24

Cuadro 1: Posibles partículas correspondientes a las masas medidas, sus masas conocidas y el error relativo.

2. Estimando la masa del Z en el LHC

El objetivo de este ejercicio es estimar la masa del bosón Z a partir de su decaimiento en dos muones. Los datos son reales tomados del CMS ($CompactMuonSolenoid$) que han sido adquiridos, analizados filtrados e identificados como colisiones en el LHC($LargeHadronCollider$) y que presentan dos muones.

Se conoce que los bosones Z pueden decaer en dos muones.Cuando se analizan desde la perspectiva de colisiones relativistas los datos de los dos muones, es posible encontrar las masas de las partículas de las cuales provienen.

En el archivo adjunto $MuRun2018B.csv$ se presentan los datos de 100 000 colisiones. Antes de poderse utilizar, los datos pasan un proceso detallado de selección y calibración para determinar, en este caso, que se produjeron dos muones (ver http://opendata.cern.ch/record/1000 para mayor información).Las columnas en la tabla tienen el mismo significado y simbología que las vistas en la sección 1.

2.1. Masa de Z e Histograma de frecuencia

Para cada colisión, calcule la masa del bosón Z utilizando sus conocimientos de Dinámica relativista. Considere unidades con = 1 para simplificar los cálculos, estos , son exactamente equivalentes a el proceso que encontramos hasta la ecuacion (5) de la sección pasada y que se ejecutado en el código 3.

Podemos entonces, con los datos de la masa , crear un histograma , donde se establece que se re quieren poco mas de 100 bins o clases para establecer frecuencias.

Para esto se puede emplear el código 1 , igual a como esta , salvo por la modificación de la base de datos, esto nos da como resultado el histograma de la figura 3.

Ahora, añadido a esto , podemos crear una modificación al codigo 1, en la cual el histograma ahora tenga en el eje y al logaritmo de la frecuencia y

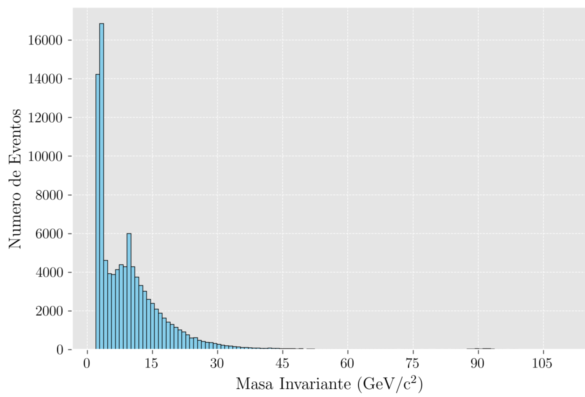

Figura 3: **Histograma de masa de partículas Z decaídas en di muones** .

no solo el la frecuencia:

```
#----------Histograma logaritmico ------

max_masa_invariante = data['
    masa_invariante'].max()
min_masa_invariante = data['
    masa_invariante'].min()

print(max_masa_invariante)

# Histograma de las masas invariantes
counts, bin_edges = np.histogram(data['
    masa_invariante'], bins=120, range=(
    min_masa_invariante ,
    max_masa_invariante))
# Encuentra la parte central "el valor que
     supondremos " de cada "bin"
bin_centers = (bin_edges[:-1] + bin_edges
    [1:]) / 2

# Graficar el histograma y los picos
    detectados
plt.figure(figsize=(7, 5), dpi=300)

plt.bar(bin_centers, np.log(counts), color
    ='blue')

# Anadir etiquetas y titulo en formato
    LaTeX
plt.xlabel(r'Masa Invariante (GeV/c$^2$)',
     fontsize=14, color='black')
plt.ylabel(r'Logaritmo de Numero de
    Eventos', fontsize=14, color='black')
plt.title(r'
         ', fontsize=16, color='black')

# Anadir una cuadricula
plt.grid(True, which='both', linestyle='--
    ', linewidth=0.5)

# Ajustar margenes
plt.tight_layout()

# Guardar la figura en formato PNG con
    alta calidad
plt.savefig('
    masa_invariante_dimuones_peaks.png',
    format='png', dpi=300)

# Mostrar la figura
```

Código 2: Fragmento de programa que nos arroja el histograma de la masa de particulas Z , con el eje y representando el logatimo de la frecuencia . NOMBRE : "6.1.3 Masa.py"

esto nos da como resultado el histograma de la figura 4.

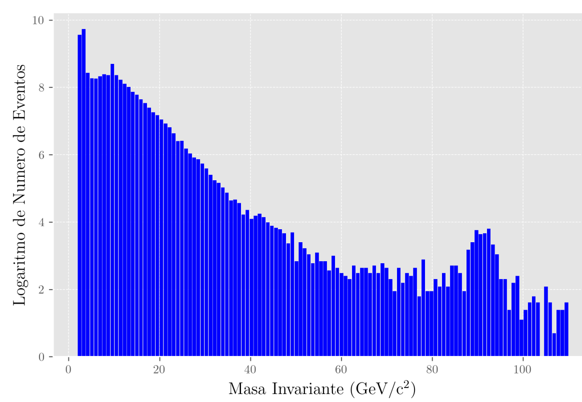

Figura 4: **Histograma de masa de partículas Z decaídas en di muones** . Este tiene la frecuencia logarítmica en comparación con la figura 3

2.2. Análisis de datos

Notemos entonces que en general , el Histograma de la figura 3 , no es mas que una versión extendida en masa y en numero de datos y por lo tanto de eventos , del historial de la figura 1. Esto explica el por que hay una gran cantidad de eventos con masas que ya habíamos visto que producían pares muón - anti muón.

Ahora, en el momento en el que utilizamos el logaritmo de las frecuencias , lo que hacemos realmente es de cierta forma, amplificar las protuberancias relevantes , y a la vez , disminuir las protuberancias insignificantes así como acortar los puntos con gran cantidad de frecuencia.

El hecho de que en la figura 4 , tengamos una protuberancia alrededor de la masa 92 GeV/c^2 , nos dice que alrededor del punto hay una partícula que decae en un par muon - anti muón.

Esta no es nada mas ni nada menos que el bosón Z, cuya masa es realmente 91.1876 GeV/c^2 .

Por otro lado , aun que la pagina Particle Data Group apunta a que en el rango de masas que manejamos , el bosón W ,con masa 80.3692 GeV/c^2, en realidad no podria decir que hay algo contundente cercano a esa area, es mas , hasta diria que hay algo de ruido .

Podria decirse que hay algunas protuberancias entre 60 y 70 GeV/c^2 , asi como entre 80 y 87 GeV/c^2 , pero esto mantiene la duda, ¿Como distinguimos entre ruido de fondo y datos que realmente nos hablan de rango de masas de una partícula en decaimiento?

Apéndice

A. Código en Python

A.1. Rocket

```python
import pandas as pd #Biblioteca que se enfoca en la manipulacion de datos , principalmente los estructurados .
import numpy as np

# Cargar los datos
data = pd.read_csv('Jpsimumu_Run2011A.csv')  #comando con el cual cargamos los datos desde el archivo csv

# Definir una funcion para calcular la masa invariante
def calcular_masa_invariante(row):
    # Energias de los muones
    E1 = row['E1']
    E2 = row['E2']

    # Componentes del momento de los muones
    px1 = row['px1']
    py1 = row['py1']
    pz1 = row['pz1']
    px2 = row['px2']
    py2 = row['py2']
    pz2 = row['pz2']

    # Energia total del sistema
    E_total = E1 + E2

    # Componentes del momento total del sistema
    px_total = px1 + px2
    py_total = py1 + py2
    pz_total = pz1 + pz2

    # Cuadrado del momento total
    p_total_squared = px_total**2 + py_total**2 + pz_total**2

    # Masa invariante del sistema
    masa_invariante = np.sqrt(E_total**2 - p_total_squared)
    return masa_invariante

# Aplicar la funcion a cada fila del DataFrame
data['masa_invariante'] = data.apply(calcular_masa_invariante, axis=1)   # Anade una nueva columna al DataFrame ||=  Aplica una funcion a cada fila del DataFrame.

# Encontrar el valor maximo y el minimo de las masas invariantes.
max_masa_invariante = data['masa_invariante'].max()
min_masa_invariante = data['masa_invariante'].min()


print(data.head())  # Mostrar las primeras filas con la masa invariante calculada


#------Graficacion -------------------

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as ticker

# Listar estilos disponibles
print(plt.style.available)
```

```python

# Usar un estilo disponible
plt.style.use('ggplot')

# Configurar matplotlib para usar LaTeX
plt.rcParams['text.usetex'] = True
plt.rcParams['font.family'] = 'serif'
plt.rcParams['font.serif'] = ['Computer Modern Roman']

# Crear la figura y el eje
fig, ax = plt.subplots(figsize=(7, 5), dpi=300)  # Tamano de la figura y calidad

# Histograma de las masas invariantes
ax.hist(data['masa_invariante'], bins=120, range=(min_masa_invariante, max_masa_invariante), color='skyblue', edgecolor='black')

# Anadir etiquetas y titulo en negro intenso
ax.set_xlabel(r'Masa Invariante (GeV/c$^2$)', fontsize=14, color='black')
ax.set_ylabel(r'Numero de Eventos', fontsize=14, color='black')
ax.set_title(r'
          ', fontsize=16, color='black')

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.xaxis.set_major_locator(ticker.MaxNLocator(integer=True))
ax.yaxis.set_major_locator(ticker.MaxNLocator(integer=True))

# Anadir una cuadricula
ax.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)

# Ajustar las etiquetas de los ejes en negro intenso
plt.xticks(fontsize=12, color='black')
plt.yticks(fontsize=12, color='black')

# Ajustar margenes
plt.tight_layout()

# Guardar la figura en formato PNG con alta calidad
plt.savefig('masa_invariante_dimuones.png', format='png', dpi=300)

# Mostrar la figura
plt.show()
```

Código 3: Programa que encuentra el histograma de frecuencias de masas de particulas decaidas a partir de las energias y momentos de di-muones . NOMBRE : ”6.1.1 Masa.py”