

Trabajo Computacional 2: Simulación de Monte Carlo

FISI-3170: Rayos Cósmicos — Semestre 2025-20

Profesor: Bernardo Gómez Moreno

Estudiante: Dynna Rangel Peñafiel

Universidad de los Andes

Decaimiento de Partículas Extrañas K^0 y Λ^0

¿Podemos distinguir entre los K^0 y los Λ^0 ?

1 Introducción a la Simulación Computacional

Antes de comenzar con la simulación propiamente dicha, resulta útil recordar algunos de los conceptos que se han trabajado en clase y que dan sentido al ejercicio que vamos a realizar. En esta práctica aplicaremos el método de **Monte Carlo** para modelar el decaimiento de partículas extrañas neutras, en particular el kaón K^0 y el barión Λ^0 . Estas partículas se producen en interacciones hadrónicas de alta energía, como las que ocurren en los rayos cósmicos o en los experimentos con colisionadores, y posteriormente decaen a través de la **interacción débil**.

El método de Monte Carlo nos permite simular procesos aleatorios generando números que siguen distribuciones de probabilidad conocidas. En este caso, su objetivo es reproducir de forma estadística los posibles decaimientos de K^0 y Λ^0 , obteniendo los vectores de momento de sus productos, aplicando transformaciones al sistema del laboratorio y analizando las distribuciones resultantes para identificar diferencias entre ambos tipos de partículas.

En las siguientes secciones se implementa paso a paso la simulación, desde la definición de las masas y energías iniciales hasta la aplicación de las transformaciones de Lorentz y la reconstrucción de los parámetros observables. De esta manera, podremos visualizar cómo, a partir de principios teóricos simples, es posible reproducir numéricamente fenómenos reales que ocurren en la física de partículas.

2 Simulación Computacional

Paso 1: Definición de parámetros de entrada (Input)

Vamos a empezar por definir las masas de las partículas involucradas y a imprimirlas para comprobar que la información del código es adecuada, en unidades de $\text{MeV } c_0^{-2}$, y el número de eventos a simular.

```
In [6]: runfile('C:/Users/yohev/.spyder-py3/temp.py',
    === PARÁMETROS DE ENTRADA ===
    Masa del K0      = 497.671 MeV/c^2
    Masa del Lambda0 = 1115.63 MeV/c^2
    Masa del protón  = 938.27231 MeV/c^2
    Masa del pión    = 139.56755 MeV/c^2
    Número de eventos = 10000
```

Figure 1: Salida del programa en Python mostrando los parámetros de entrada definidos para la simulación.

Como vemos, se definieron las masas de las partículas madre y de sus productos de decaimiento. Los valores utilizados corresponden a los reportados por el PDG (Particle Data Group). También se establece el número total de eventos N_{events} que determinará la estadística de la simulación.

Pasos 2 a 6: Selección del proceso, energía y marco de referencia

En los siguientes pasos se elige aleatoriamente qué partícula decae (K^0 o Λ^0), se le asigna una energía aleatoria en el sistema del laboratorio, se calcula su momento, y se determinan los factores de Lorentz necesarios para transformar al sistema donde la partícula está en reposo.

```
visualizamos los eventos
Evento o Situación 1: K0 -> E1'=248.84 MeV, E2'=248.84 MeV, p'=206.01 MeV/c
Evento o Situación 2: K0 -> E1'=248.84 MeV, E2'=248.84 MeV, p'=206.01 MeV/c
Evento o Situación 3: K0 -> E1'=248.84 MeV, E2'=248.84 MeV, p'=206.01 MeV/c
Evento o Situación 4: Lambda -> E1'=943.64 MeV, E2'=171.99 MeV, p'=100.51 MeV/c
Evento o Situación 5: K0 -> E1'=248.84 MeV, E2'=248.84 MeV, p'=206.01 MeV/c
```

Figure 2: Visualización de los primeros eventos generados en la simulación Monte Carlo. Se muestran los valores de las energías E'_1 , E'_2 y el momento p' de los productos de decaimiento para partículas K^0 y Λ^0 en el sistema de reposo.

Cada evento de la simulación se genera eligiendo de forma aleatoria el tipo de partícula madre. En la mitad de los casos, corresponde al decaimiento $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, mientras que en la otra mitad se simula el proceso $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$.

La energía total de la partícula madre se asigna a partir de una distribución gaussiana centrada en $2M$, con una desviación estándar de $0.2M$, lo que introduce una variación realista en los eventos simulados.

A partir de esa energía se calcula su momento relativista mediante $p = \sqrt{E^2 - M^2}$, así como los factores de Lorentz $\gamma = E/M$ y $\beta = p/E$. En el sistema de reposo de la partícula que decae, las energías y momentos de los productos se determinan siguiendo las expresiones del decaimiento en dos cuerpos.

En pocas palabras, este procedimiento permite recrear de forma estadística cómo una partícula inestable se desintegra y cómo sus productos se comportan en distintos sistemas de referencia, tal como ocurriría en un experimento real.

Paso 7: Dirección aleatoria de los productos de decaimiento

El decaimiento de una partícula en reposo es **isótropo**, lo que significa que la dirección de emisión de los productos es igualmente probable en cualquier dirección del espacio. Por tanto, el vector momento de uno de los productos se genera aleatoriamente sobre la superficie de una esfera, definiendo los ángulos θ y ϕ de manera uniforme según las expresiones:

$$\theta = \arccos(2r_1 - 1), \quad \phi = 2\pi r_2,$$

donde r_1 y r_2 son números aleatorios uniformemente distribuidos entre 0 y 1. En pocas palabras, esta condición de isotropía asegura que la simulación no favorece ninguna dirección específica, reproduciendo el carácter aleatorio y simétrico que se observa en los decaimientos reales de partículas.

Las direcciones son las siguientes:
Ejemplo: $\theta = 84.37^\circ$, $\phi = 84.80^\circ$

Figure 3: direcciones aleatorias generadas para los productos de decaimiento.

La elección aleatoria de las direcciones de momento se realiza generando dos números aleatorios r_1 y r_2 , a partir de los cuales se calculan los ángulos esféricos θ y ϕ . De esta manera, los productos del decaimiento se distribuyen uniformemente sobre la superficie de una esfera, satisfaciendo la condición de isotropía propia del proceso. El segundo producto se genera automáticamente en dirección opuesta para garantizar la conservación del momento total. Este procedimiento asegura que la simulación represente un decaimiento completamente simétrico, tal como ocurriría en la naturaleza cuando una partícula se desintegra en reposo.

Pasos 7–8: Componentes de momento y transformación al sistema del laboratorio

Una vez que ya hemos logrado las direcciones aleatorias de los productos de decaimiento, procedemos a calcular las componentes del momento lineal de cada partícula hija. El siguiente paso consiste en transformar dichos vectores desde el sistema de reposo de la partícula que decae (S') hasta sistema del laboratorio (S), utilizando las transformaciones de Lorentz que ya conocemos.

Transformaciones de Lorentz
Evento 1: Evento 1 en un laboratorio= 737.37 MeV, Evento 2 en un laboratorio = 381.67 MeV
p_1_laboratorio = 699.71, p_2_laboratorio= 302.57

Figure 4: Resultado del programa en Python correspondiente al Paso 8 de la simulación, donde se muestran las transformaciones de Lorentz aplicadas al sistema del laboratorio.

En el sistema S' donde la partícula madre está en reposo, los productos de decaimiento tienen momentos opuestos $\mathbf{p}'_1 = -\mathbf{p}'_2$ y energías determinadas únicamente por las masas involucradas.

Ahora, para lograr obtener las cantidades medibles en el laboratorio (S), vamos a aplicar la transformación de Lorentz en la dirección del eje x (dirección de movimiento de la partícula madre):

$$\begin{aligned} E &= \gamma(E' + \beta p'_x), \\ p_x &= \gamma(p'_x + \beta E'), \\ p_y &= p'_y, \quad p_z = p'_z. \end{aligned}$$

Con estas ecuaciones obtenidas vamos a calcular las energías y momentos en el laboratorio para posteriormente observar los eventos correspondiente a K^0 y Λ^0 .

Pasos 9–11: Energías, “smearing” y momentos observados

En esta etapa de la simulación se determinan las energías y momentos de los productos de decaimiento en el sistema del laboratorio, a partir de las transformaciones de Lorentz aplicadas en el paso anterior. Con estos valores se calculan los ángulos polares (θ) y azimutales (ϕ), que describen la dirección de emisión de las partículas cargadas resultantes.

Se aplicó el procedimiento de “smearing”, el cual introduce una incertidumbre gaussiana del 10% en las magnitudes físicas (E, θ, ϕ) con el fin de reproducir la resolución experimental de un detector real. Este proceso permite obtener valores de energías y momentos que simulan las fluctuaciones presentes en las mediciones experimentales.

Me parece importante señalar que el método *smearing* es fundamental porque permite incorporar los efectos de las limitaciones instrumentales dentro de la simulación. Es decir, añadimos ruido controlado a las variables simuladas para obtener un modelo más realista y comparable con los datos medidos en un experimento verdadero, donde las incertidumbres y la precisión del detector afectan inevitablemente los resultados observados.

```
Ángulos posibles en el laboratorio:  

θ₁ = 31.94°, φ₁ = -124.61°  

θ₂ = 22.33°, φ₂ = 55.39°  

Resultados con 'smearing' aplicado  

Evento o situación 1:  

E₁_obs = 359.98 MeV, E₂_obs = 622.85 MeV  

p₁_obs = 331.82 MeV/c, p₂_obs = 607.02 MeV/c
```

Figure 5: Se muestran los ángulos de emisión de las partículas en el laboratorio y los valores de energía y momento luego de aplicar el “smearing”.

Los resultados presentados son coherentes con la naturaleza aleatoria del método Monte Carlo. Los ángulos θ y ϕ muestran una distribución isotrópica, indicando que todas las direcciones de emisión son igualmente probables. Las energías y momentos reconstruidos conservan la energía total del sistema dentro de las fluctuaciones esperadas por el proceso de “smearing”.

Pasos 12–14: Componentes, ángulos y masa invariante relativista

Luego se calcularon las **componentes longitudinales y transversales** del momento de los productos del decaimiento, el **ángulo entre ambos vectores** y la **masa invariante relativista** de la partícula madre. Estos valores permiten identificar si el evento

simulado corresponde a un decaimiento del mesón K^0 o del barión Λ^0 , comparando la masa reconstruida con los valores teóricos conocidos. Recordemos que esto nos ayuda a responder la pregunta inicial con la que empieza la simulación.

```
Componentes del momento que se pueden observar
p1_par = 1781.89 MeV/c, p1_T = 91.66 MeV/c
p2_par = 493.73 MeV/c, p2_T = 85.29 MeV/c

Ángulo entre los productos del decaimiento
θ₁₂ = 12.73°

Masa invariante reconstruida
Masa reconstruida del evento 1 = 1119.30 MeV/c²
```

Figure 6: Se muestran las componentes longitudinales y transversales del momento de los productos del decaimiento, el ángulo entre ellos y la masa invariante reconstruida.

Vemos que en la simulación, obtuvimos que el valor de $M^{\text{obs}} = 1119.30 \text{ MeV}/c^2$ coincide con la masa del barión Λ^0 , indicando que el evento simulado corresponde al decaimiento. $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$. Contestando la pregunta principal.

Plot de Armenteros y Resultados Finales

Finalmente, se generó el **Plot de Armenteros** a partir de los resultados de la simulación de Monte Carlo. Este gráfico representa la **asimetría longitudinal del momento** de los productos del decaimiento (α) frente al **momento transversal** (q_T). Cada punto corresponde a un evento simulado, y las distribuciones resultantes permiten diferenciar los decaimientos de partículas extrañas K^0 y Λ^0 .

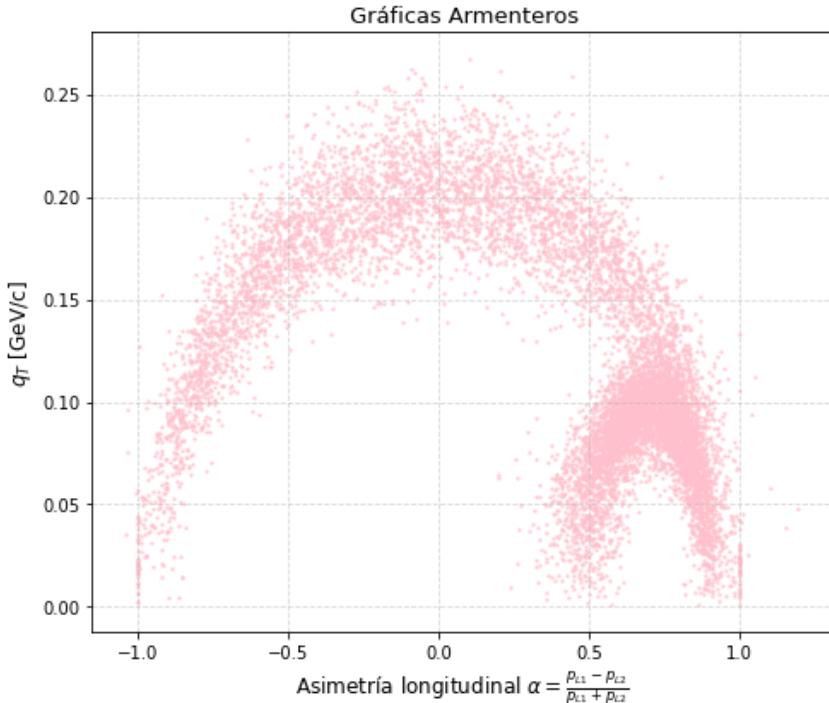


Figure 7: Plot de Armenteros. En el eje horizontal se muestra la asimetría longitudinal α y en el eje vertical el momento transversal q_T . La distribución arqueada observada corresponde a los eventos de decaimiento simulados de K^0 y Λ^0 , evidenciando sus diferentes patrones cinemáticos.

El gráfico obtenido muestra la forma característica del *Armenteros plot*, donde los eventos de K^0 se concentran cerca de $\alpha \approx 0$, mientras que los de Λ^0 se extienden hacia valores positivos de α . Esto confirma que, a partir de las variables cinemáticas obtenidas en la simulación, es posible distinguir entre ambos tipos de partículas de acuerdo con su distribución en el espacio (α, q_T).

Cabe notar que en este caso solo se simuló el decaimiento de partículas K^0 y Λ^0 , sin incluir sus antipartículas. Por esa razón, la segunda “montañita” visible en la parte inferior izquierda del gráfico corresponde a los eventos de Λ^0 , mientras que la estructura simétrica del lado derecho—presente en el gráfico de referencia visto en clase—no aparece aquí, ya que proviene del decaimiento de las antipartículas $\bar{\Lambda}^0$ y \bar{K}^0 . En pocas palabras, la asimetría del resultado se debe a que la simulación solo considera una de las familias de partículas, reproduciendo correctamente su comportamiento esperado.

Conclusiones

La simulación de Monte Carlo implementada permitió reproducir de forma realista los decaimientos de partículas extrañas K^0 y Λ^0 , mostrando que es posible distinguir ambos procesos a partir de las distribuciones angulares y de masa invariante. El Plot de Armenteros final evidenció las diferencias cinemáticas entre los dos tipos de eventos, validando la consistencia del modelo y la utilidad del método en el análisis de datos de física de partículas.