

# Simulación y análisis de eventos de colisión tipo CMS: energía faltante y reconstrucción del bosón Z

Estefanía Zapata Valderrama 1006373242

Santiago Angulo 1001154362

## Descripción del Problema

En el experimento **CMS** del **LHC**, protones colisionan a energías del orden de los TeV, generando diversas partículas producto. Algunas de estas, como los **neutrinos** o partículas hipotéticas de materia oscura, no dejan señales directas en el detector. Como los protones tienen momento transversal neto casi nulo antes de colisionar, la suma vectorial de los momentos transversales tras la colisión debería conservarse:

$$\sum \vec{p}_T^{\text{detectadas}} \approx 0$$

Cuando esto no ocurre, se interpreta como **energía faltante transversal (MET)**:

$$\text{MET} = \left| \sum \vec{p}_T^{\text{detectadas}} \right|$$

El MET permite inferir la existencia de partículas invisibles. En este proyecto se simulan eventos en el plano transversal, asignando momentos aleatorios  $p_T$  y ángulos  $\phi$ , calculando las componentes:

$$p_x = p_T \cos \phi, \quad p_y = p_T \sin \phi$$

y verificando la conservación del momento. Además, se aborda la **reconstrucción del bosón Z** a partir de sus productos de decaimiento, como pares de muones, mediante el cálculo de su masa invariante. Para ello se usa:

$$p_z = p_T \sinh \eta, \quad E = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + m^2}$$

$$m_{\text{inv}} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

El proyecto se divide en dos partes:

1. **Simulación simplificada:** generación de eventos en Python y análisis estadístico del MET.
2. **Simulación realista:** uso de **MadGraph**, **Pythia** y **Delphes** para generar eventos, analizados con **ROOT** a partir de archivos **.root**, para calcular MET y reconstruir el bosón Z.

## Objetivo general

Simular y analizar eventos de colisión tipo CMS para estudiar la conservación del momento transversal, identificar eventos con energía faltante y reconstruir el bosón Z a partir de sus productos de decaimiento.

## Objetivos específicos

- Simular colisiones protón-protón en el plano transversal, analizando la conservación del momento y calculando la energía faltante (MET) mediante métodos Monte Carlo y álgebra vectorial.
- Analizar eventos simulados con herramientas como **MadGraph**, **Pythia**, **Delphes** y **ROOT**, calculando el MET y reconstruyendo el bosón Z a partir de pares de muones.
- Comparar resultados entre la simulación simplificada y la cadena realista de simulación, evaluando el comportamiento del MET y la efectividad en la reconstrucción de partículas invisibles.

## Conceptos a Aplicar

- **Monte Carlo:** Para generar direcciones y magnitudes aleatorias de momento transversal en partículas producto.
- **Álgebra lineal:** Para calcular sumas vectoriales y conservar el momento.
- **Estadística:** Para el análisis de distribuciones de MET y masa invariante.
- **Visualización:** Para representar eventos (plano XY), histogramas y análisis comparativo.

# Metodología

## Parte 1: Simulación con Python

- Se generarán eventos con 2 a 4 partículas con momento  $p_T$  aleatorio (distribución exponencial) y ángulo uniforme entre  $[0, 2\pi]$ .
- Se calculará la energía faltante MET mediante la suma vectorial de los momentos en el plano transversal.
- Se realizarán visualizaciones con `matplotlib` y se analizarán estadísticamente los resultados.

Librerías: NumPy, Matplotlib, SciPy

## Parte 2: Análisis de archivo `.root`

- Se utilizará `uproot` para leer eventos simulados desde un archivo `.root`.
- Se extraerá información sobre muones, como  $p_T$ ,  $\eta$ ,  $\phi$ .
- Se calcularán las componentes del momento y la energía.
- Se calculará la masa invariante de pares de muones de carga opuesta para reconstruir el bosón Z.
- Se graficará la distribución de MET y de masa invariante.

Librerías: Uproot, NumPy, Matplotlib, Pandas

## Resultados Esperados

- Visualización de eventos simulados en el plano transversal mediante diagramas de momento, junto con histogramas de energía faltante (MET) y el cálculo del porcentaje de eventos con alta MET.
- Histogramas de MET y de masa invariante obtenidos a partir del análisis del archivo `.root`, con un pico visible del bosón Z alrededor de 91 GeV en eventos con pares de muones.
- Comparación gráfica y cuantitativa entre la simulación simplificada y el análisis realista, evaluando la consistencia del comportamiento del MET y la calidad de la reconstrucción del bosón Z.

## Referencias

- CMS - Experiment — CERN: <https://home.web.cern.ch/science/experiments/how-detector-works>
- LHC Closer Look – Conservación del momento: [https://www.lhc-closer.es/taking\\_a\\_closer\\_look\\_at\\_lhc/0.momentum/idioma/es\\_ES](https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.momentum/idioma/es_ES)