

Estudios de simulación en la búsqueda de nuevos bosones ligeros durante la fase de alta luminosidad del experimento CMS del CERN

Autor:

Lic. Francisco Martínez Sánchez

Miembros del comité:

Alfredo Martín Castañeda Hernandez (Director)

Susana Alvarez Garcia (tutor)

Marcelino Barbosa Flores (tutor)

Reporte Avance de Tesis, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora 2020

Outline

1 Introducción

2 Simulación

3 Análisis

Introducción

●ooooooooooooooo

Simulación

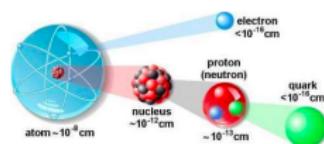
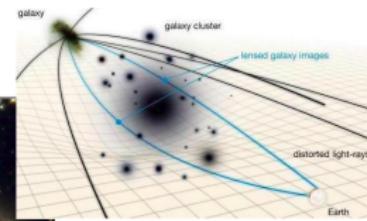
oooooooooooo

Análisis

oooooooooooooooooooo

Introducción y Marco Teórico

Evidencias de materia oscura.



- Rotación de las galaxias
- Lentes gravitacionales
- Coalición de galaxias
- Formación de estructuras

Modelo Estándar

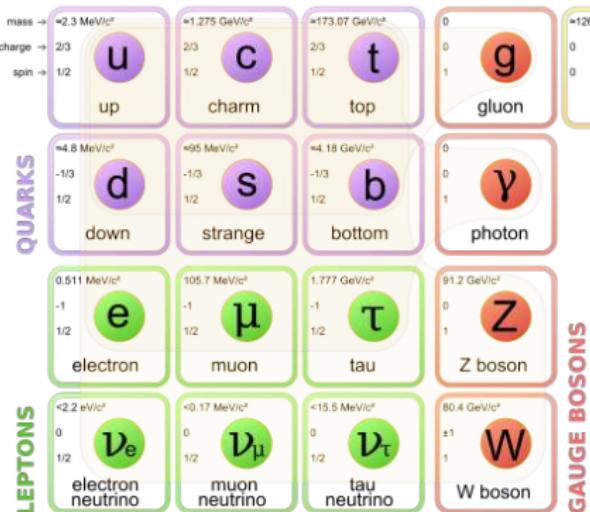


Figura: Modelo estándar de la física de las partículas elementales.

Modelo Estándar. Lagrangiano.

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

- Primera linea describe las fuerzas elementales electromagnetismo, fuerza nuclear debil y fuerte)
- La segunda linea describe como las fuerzas actuán en las partículas fundamentales (quarks y leptones)
- Tercera linea describe como las partículas obtienen sus masas del bosón de Higgs
- La cuarta linea describe el campo de Higgs

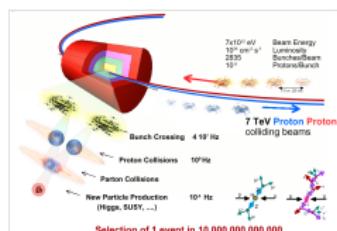
Mas alla del modelo estándezar

El modelo estándezar describe de forma exitosa como funciona el universo sin embargo falla en dar explicación a fenómenos tales como:

- Descripción cuantica de la fuerza de gravedad
- **Materia Oscura: Por observaciones cosmologicas se sabe que el modelo estándezar solo contempla el 5 % de la energia presente en el universo. Cerca de 26 % debe de ser materia oscura, la cual solo interactua debilmente con los campos del modelo estándezar. El modelo estándezar no contempla partículas fundamentales como constituyentes de la materia oscura**
- Energia Oscura
- Masa del neutrino
- Asimetria materia-Antimateria

Mas alla del modelo estándar. Modelo Dark-SUSY.

- La materia oscura esta compuesta de partículas fundamentales
- Estas partículas están descritas por un formalismo teórico parecido al del modelo estándar (Teoría cuántica de campo)
- Que estas nuevas partículas puedan ser producidas por medio de la colisión de protones altamente energéticos (como las producidas en el Gran Acelerador de Hadrones)



Mas alla del modelo estándar. Modelo Dark-SUSY.

Las nuevas fuerzas en el escenario Dark-SUSY puede asociarse al modelo estándar por medio de un termino de mezcla (kinetic mixing) que en forma de lagrangia tiene la siguiente forma:

$$\mathcal{L}_{KM} = -\frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu}^Y F^{D_{\mu\nu}}$$

donde $F_{\mu\nu}^Y = \partial_\nu A_\mu^D - \partial_\mu A_\nu^D$ es el campo de fuerzas en el sector oscuro. El rango tipico de ϵ es en el rango $10^{-8} - 10^{-2}$.

Mas alla del modelo estándar. Modelo Dark-SUSY

- Producción de fotones oscuros por medio del portal del Higgs.
- En este modelo el Higgs decae a partículas supersimétricas (neutralinos n_1)
- subsequentemente cada neutralino decae a un neutralino oscuro (n_D) y un fotón oscuro (γ_D)
- Cada fotón oscuro decae a un par de muones de carga opuesta

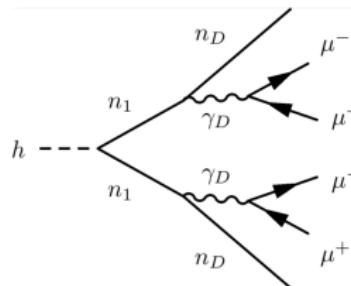


Figura: Diagrama de Feynman del modelo Dark-SUSY

Mas alla del modelo estándar. Modelo Dark-SUSY

Decaimiento del foton oscuro a leptones

- Debido al factor de mezcla ϵ el foton oscuro decae a leptones del modelo estandar con una anchura parcial dada por la siguiente expresion:

$$\Gamma_{\gamma_D} \rightarrow l\bar{l} = \frac{1}{3}\alpha\epsilon^2 m_{\gamma_D} \sqrt{1 - \frac{4m_l^2}{m_{\gamma_D}^2}} \left(1 + \frac{2m_l^2}{m_{\gamma_D}^2}\right) \quad (1)$$

Donde m_l es la masa del lepton (e, μ , or τ)

Mas alla del modelo estándar. Modelo Dark-SUSY

Tiempo de vida

- El tiempo de vida esta relacionado a la anchura de decaimiento con la siguiente expresión

$$\tau_{\gamma_D} = \frac{\hbar}{\Gamma_{\gamma_D}} \Rightarrow \tau_{\gamma_D}(\epsilon, m_{\gamma_D}) = \frac{1}{\epsilon^2} \times f(m_{\gamma_D}) \quad (2)$$

Es decir el tiempo de vida es una función de la masa del fotón oscuro y el parámetro de mezcla ϵ .

Es conveniente expresar el tiempo de vida como una distancia $c\tau_{\gamma_D}$, donde c es la velocidad de la luz. También es conveniente medir $c\tau_{\gamma_D}$ en milímetros para relacionar la sensitividad del modelo en el análisis de datos.

$$c\tau_{\gamma_D}(\epsilon, m_{\gamma_D})[mm] = \frac{c[mm/s] \times \hbar[GeV.s]}{\epsilon^2} \times f(m_{\gamma_D}[GeV^{-1}]) \quad (3)$$

Propiedades del modelo

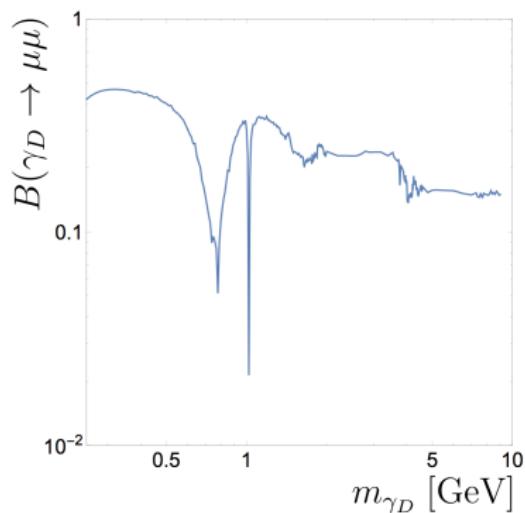


Figura: Probabilidad de decaimiento del fotos oscuro a dos muones

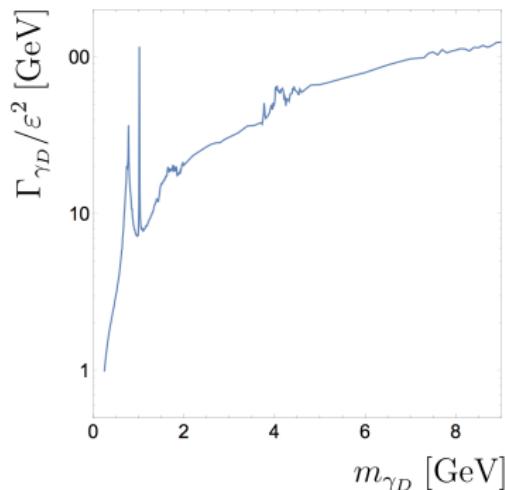


Figura: Amplitud del decaimiento dividido por el coeficiente de mezcla cinético

Problema de la investigación.

Actualmente los modelos teóricos que predicen la formación de nuevas partículas de materia oscura no han sido explorados ampliamente, por lo que no hay muchos métodos desarrollados de identificación y caracterización de las posibles señales que ayuden a optimizar el proceso de calibración cuando se logre alcanzar el espacio fase de estos modelos.

Hipótesis

Si se hace supuesto que la materia oscura está descrita por la teoría MSSMD, al reconstruir la señal desde los detectores por medio de la simulación es posible crear métodos flexibles y eficientes de caracterización, identificación y reconstrucción de las partículas hipotéticas predichas por la teoría.

Objetivo General

Estudiar por medio de simulación de Monte Carlo el modelo teórico “Dark Susy”, reconstruyendo teóricamente las propiedades del fotón oscuro en un entorno simulado de los detectores que realizarían la detección en configuraciones experimento CMS llamada Run-2 y en Alta Luminosidad.

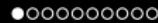
Objetivos específicos.

- Recreación de la teoría por medio de simulación mediante el desarrollo de un entorno de simulación y análisis usando los recursos computacionales de la Universidad de Sonora (ACARUS).
- Desarrollo de métodos de identificación de la señal a caracterizar.
- Caracterizar la señal en cuestión y sus propiedades en el contexto del experimento CMS y sus futuras actualizaciones.

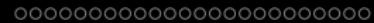
Introducción



Simulación



Análisis



Simulación

Simulación

- Para estudiar el modelo Dark-SUSY de forma experimental y caracterizar las propiedades de la señal se requiere generar muestras de simulación por el método de Monte Carlo
- La simulación requiere generar varias muestras considerando los parámetros más importantes del fotón oscuro (masa y tiempo de vida)
- Para generar las muestras simuladas se hace uso de paquetes propios del área de altas energías, los cuales actúan de forma secuencial y se encargan de diferentes aspectos del proceso de análisis.

Paquetes de Simulación

- **Madgraph:** Se encarga de procesar la información fundamental del modelo como la masa de las partículas madre, diagramas de Feynman, amplitudes de decaimiento, etc.
- **Pythia:** Se encarga del proceso de hadronización, es decir la interacción entre protones, recombinación de quarks y formación de nuevas partículas
- **Delphes:** Se encarga de simular la respuesta del detector al paso de las partículas simuladas, en este paso se consideran eficiencia de detecciones y se extraen variables como la energía, momento y trayectoria reconstruida de las partículas en cuestión

Estrategia de Simulación

- Para generar las muestras se requiere crear un entorno automatizado (python) el cual pueda ser flexible a las diferentes variaciones del modelo
- Los archivos resultantes (formato .root) contienen la información (teórica+experimental) para realizar el análisis de datos.

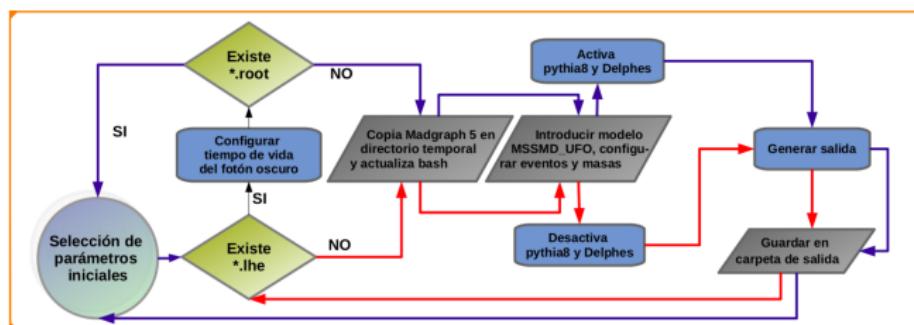


Figura: Diagrama de Flujo del generador.

Muestras simuladas

- Para generar cada muestra se requiere especificar los siguientes parámetros: masa del neutralino (m_{n_1}), masa del dark neutralino (m_{n_D}), masa del fotón oscuro (m_{γ_D}) y tiempo de vida del foton oscuro ($c\tau_{\gamma_D}$) que son los parámetros del modelo Dark-SUSY.
- El número de muestras simuladas es el resultado de todas las combinaciones posibles de los vectores correspondientes a los parámetros de generación, haciendo un total de ~ 15000 muestras:

$$V_{m_{n_1}} = [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]$$

$$V_{m_{n_D}} = [0.25, 1, 2, 3, 4, 5, 10]$$

$$V_{m_{\gamma_D}} = [0.25, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]$$

$$V_{c\tau_{\gamma_D}} = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100]$$

$$\text{Eventos simulados} = 10000$$

Simulación del Detector en Delphes

- Delphes es un paquete de simulación rápida, es decir alguna de las eficiencias de detección están parametrizadas, lo anterior para reducir el tiempo de simulación
- Dichas parametrizaciones se obtienen de la simulación más detallada (Geant4) la cual contempla todos los procesos fundamentales del paso de las partículas por el detector
- En nuestro modelo los fotones oscuros decaen a muones, por lo que la reconstrucción de los mismos es parte fundamental del análisis

Identificación de muones en CMS

- Los muones son partículas elementales que interactúan débilmente con la materia, su trayectoria se reconstruye con información obtenida de detectores dedicados a esta tarea
- A partir de la trayectoria reconstruida y la desviación provocada por el campo magnético solenoide se puede obtener el valor del momento.
- Debido a que el fotón oscuro puede viajar una distancia considerable antes de decaer la eficiencia de reconstrucción de muones está íntimamente ligado al tiempo de vida ($c\tau$)
- En general se espera que a mayor tiempo de vida del fotón oscuro la eficiencia de identificación es menor (debido a que los muones logran atravesar solo una parte de los dispositivos de detección)

Identificación de muones en CMS

- La linea azul representa el paso de los muones por el detector CMS

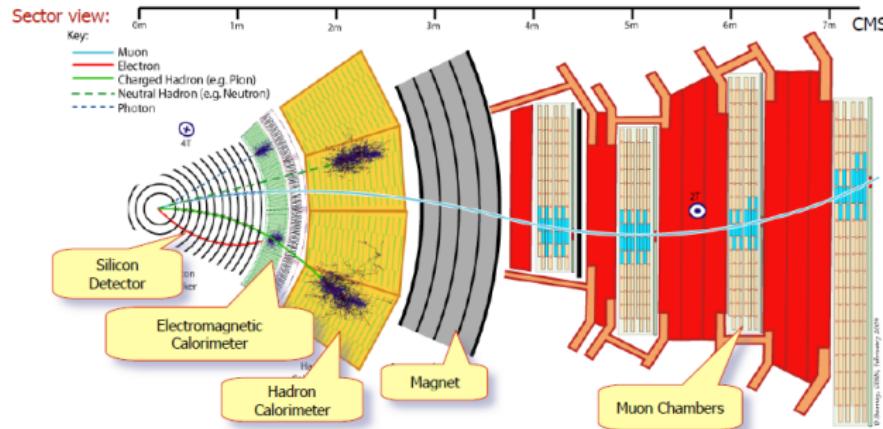
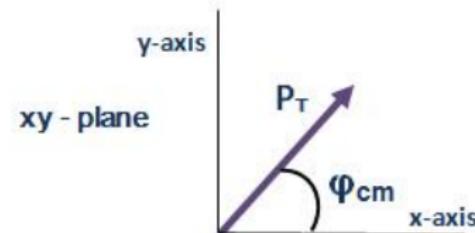
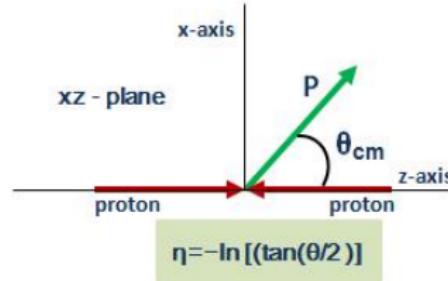


Figura: Identificación de partículas en CMS, vista transversal del detector

Definición de variables relevantes

El detector CMS tiene una simetría cilíndrica en donde el eje de colisión es el “z” y el plano transversal está formado por los ejes “x” e “y”. Dos de las variables para caracterizar las propiedades de las partículas son las siguientes.



$$P_T = P \cdot \sin \Phi_{cm}$$

Figura: Definición de pseudorapidez

Figura: Definición de momento transversal

Parametrización de eficiencia y resolución

Estas parametrización están contenidas en la simulación Delphes

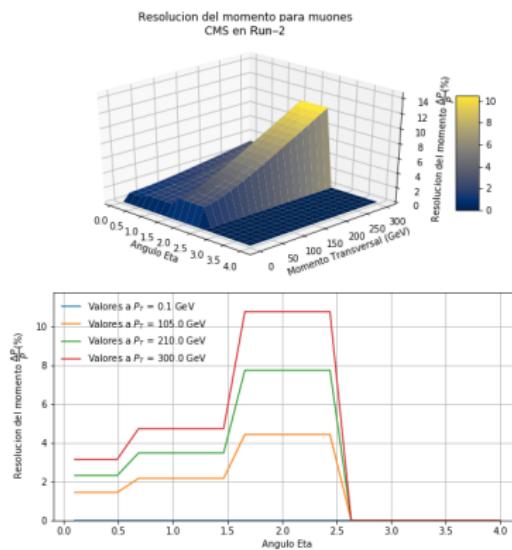


Figura: Resolución del momento para muones.

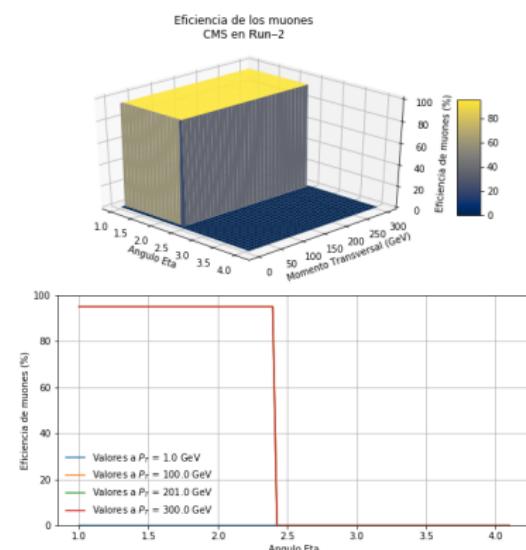


Figura: Eficiencia en la reconstrucción de los muones.

Introducción

oooooooooooooooooooo

Simulación

oooooooooooo

Análisis

●oooooooooooooooooooo

Análisis

Estrategia del análisis de datos

- El análisis se basa en una selección de eventos a partir de una serie de variables experimentales las cuales buscan optimizar la eficiencia de la señal y reducir lo mas posible los procesos de ruido.
- Recordar que en los datos experimentales solo se tiene información de los muones reconstruidos y a partir de eso se infiere la posible producción de fotones oscuros.
- La selección de eventos se aplica a cada una de las muestras de simulación generadas y se estudia las eficiencias y distribuciones características.

Secuencia del análisis de datos

- El análisis comienza con la muestra simulada (raw data)
 - Se procede a la selección de eventos, donde se reduce la cantidad de datos a analizar
 - Se procede a la obtención de resultados, gracias estadísticas y discusión de los mismos, algo similar al esquema mostrado en la figura

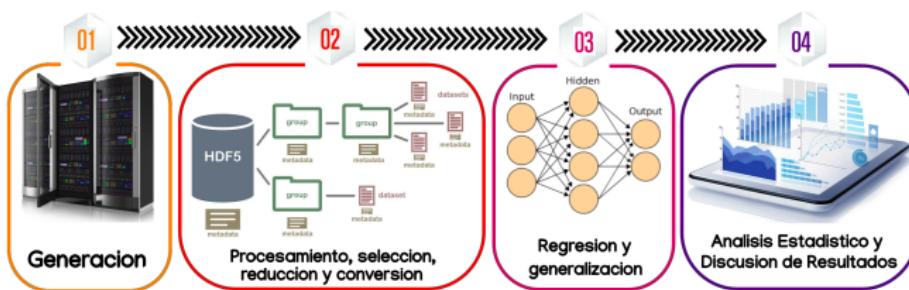


Figura: Secuencia del análisis de datos

Estructura del código de análisis

- Se desarrolló un entorno de simulación y análisis de datos el cual está basado en código de python y ROOT.
- El entorno se encuentra hospedado en ACARUS y puede ser fácilmente extendido para el análisis de otros modelos (adicionales a Dark-SUSY)

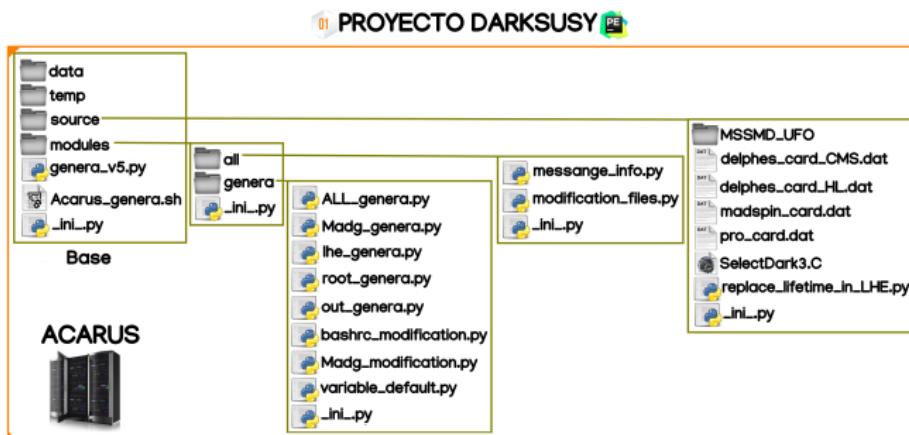


Figura: Estructura del código de análisis

Selección preliminar

- **Algoritmo de pareamiento de muones:** Encontrar el par de muones óptimos que con mayor probabilidad podrían ser generados por un fotón oscuro.
- **Algoritmo con identificador de machine learning di-muon:** Optimizas la detección haciendo conocida las muestras y pareamientos reales con la paquetería de tensorflow.

Algoritmo de paramiento de muones

02 PROYECTO CLASS DARKSUSY PE

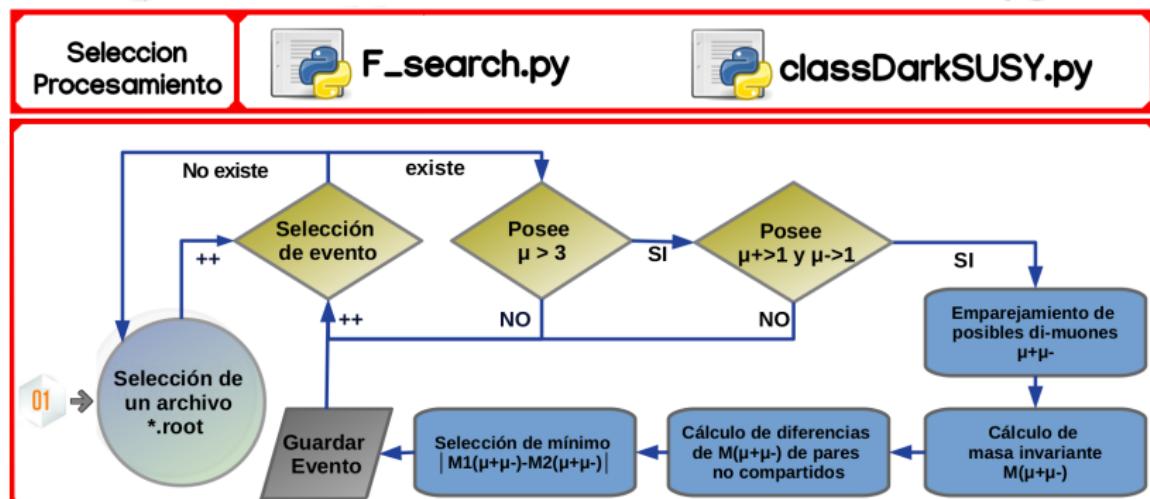


Figura: Diagrama de algoritmo de paramiento. Eficiencia conocida de 87 %.

Algoritmo con identificador de machine learning di-muon

Proceso de entrenamiento y creación del modelo.

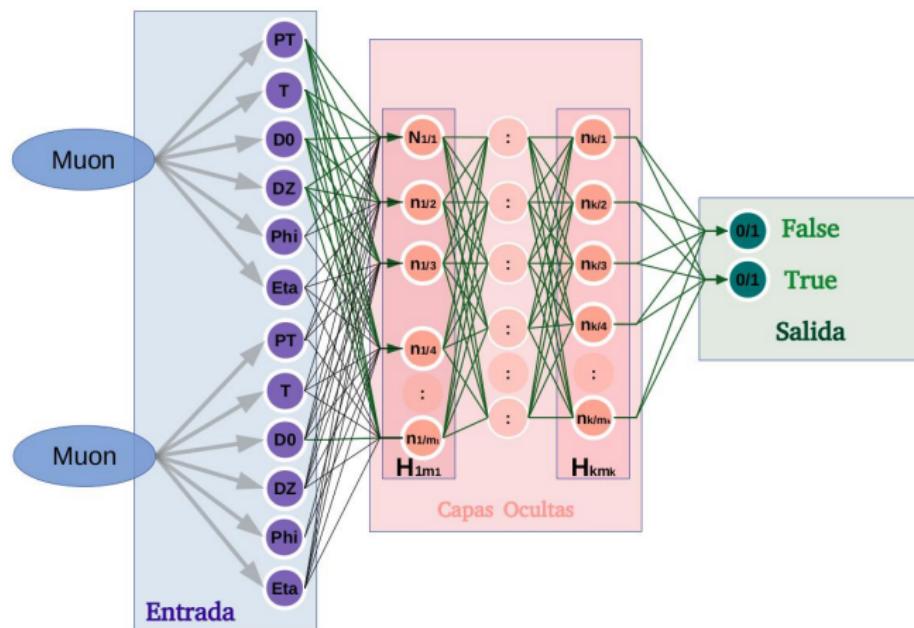


Figura: Creación del identificador. Eficiencia conocida de 98 %.

Eficiencia para fotón oscuro con detector CMS

Selección	$c\tau = 0.5$	$c\tau = 5$	$c\tau = 10$	$c\tau = 50$	$c\tau = 100$
Sin corte	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
4- μ	916	500	227	16	2
pariamiento	916	500	227	16	2

Tabla: Tabla con el numero de eventos después de cada selección $m_{\gamma_D} = 0.25 \text{ GeV}$ y diferentes valores del tiempo de vida para el detector CMS.

Selección	$c\tau = 0.5$	$c\tau = 5$	$c\tau = 10$	$c\tau = 50$	$c\tau = 100$
Sin corte	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
4- μ	955	968	947	862	655
pariamiento	955	968	947	862	655

Tabla: Tabla con el número de eventos después de cada selección $m_{\gamma_D} = 8 \text{ GeV}$ y diferentes valores del tiempo de vida para el detector CMS.

Distribuciones características: Masa invariante

- Después de la selección preliminar se puede reconstruir la masa de los muones, dicha masa correspondería a la masa de los fotones oscuros. A continuación se muestra un ejemplo para los procesos con un valor esperado de $m_\gamma = 4\text{ GeV}$:

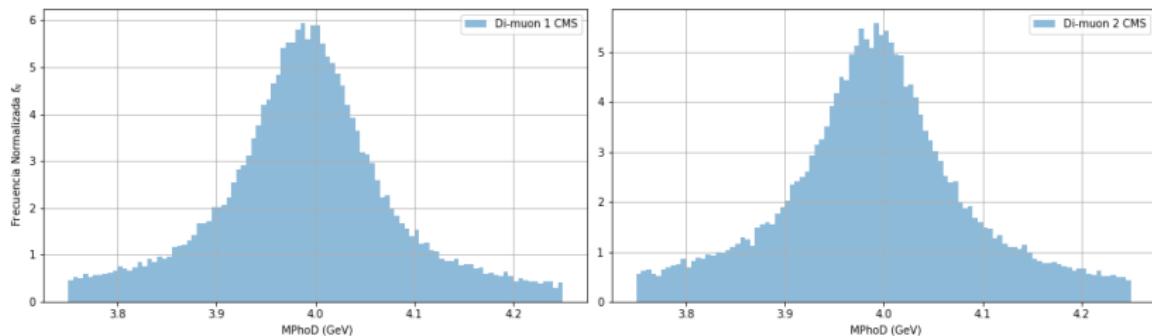


Figura: Masa invariante para los di-muones.

Distribuciones características: Parámetros

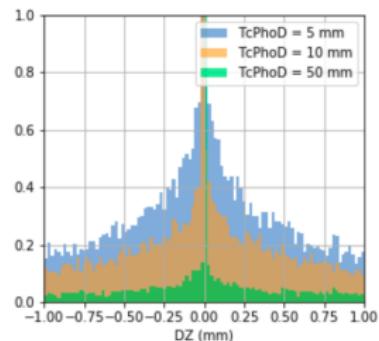
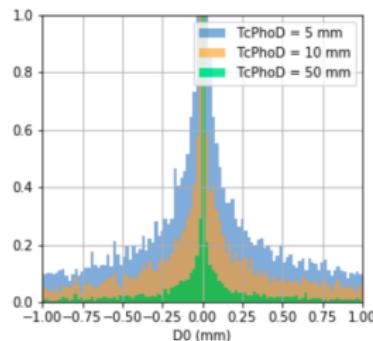
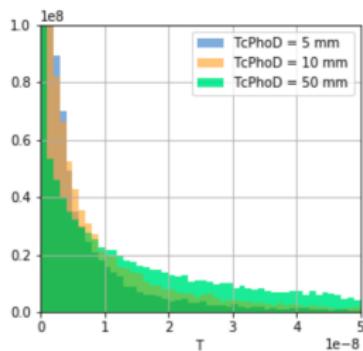


Figura: Variaciones de algunas propiedades del muon con el cambio de tiempo de vida del fóton oscuro.

Introducción

oooooooooooooooooooo

Simulación

oooooooooooo

Análisis

oooooooooooo●oooooooooooo

High Luminosity LHC

Eficiencia para fotón oscuro para detector HL.

Selección	$c\tau = 0.5$	$c\tau = 5$	$c\tau = 10$	$c\tau = 50$	$c\tau = 100$
Sin corte	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
4- μ	1678	902	433	39	6
pariamiento	1678	902	433	39	6

Tabla: Tabla con el número de eventos después de cada selección $m_{\gamma_D} = 0.25 \text{ GeV}$ y diferentes valores del tiempo de vida para el detector HL.

Selección	$c\tau = 0.5$	$c\tau = 5$	$c\tau = 10$	$c\tau = 50$	$c\tau = 100$
Sin corte	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
4- μ	1914	1915	1844	1614	1208
pariamiento	1914	1915	1844	1614	1208

Tabla: Tabla con el número de eventos después de cada selección $m_{\gamma_D} = 8 \text{ GeV}$ y diferentes valores del tiempo de vida para el detector HL.

Eficiencia para fotón oscuro. Regresión.

Con la intención de generalizar los valores de eficiencia de los detectores mediante un método predictivo, se intenta aplicar dos métodos de regresión :

1- Método de regresión Polinomial

$$\ln y = \sum_{i=0}^k (\alpha_{0i} + \alpha_{1i} \cdot x_i + \alpha_{2i} \cdot x_i^2 + \alpha_{3i} \cdot x_i^3 + \dots + \alpha_{ni} \cdot x_i^n) + \epsilon \quad (4)$$

el orden de la regresión está dado por n y los valores x_i serán las variables independientes de nuestro modelo, estos fueron integrados en una función en python implementando la paquetería sklearn con la flexibilidad de cambiar los valores k y n .

Eficiencia para fotón oscuro. Regresión.

Los resultados de su implementación de la regresión polinomial:

1- Método de regresión Polinomial

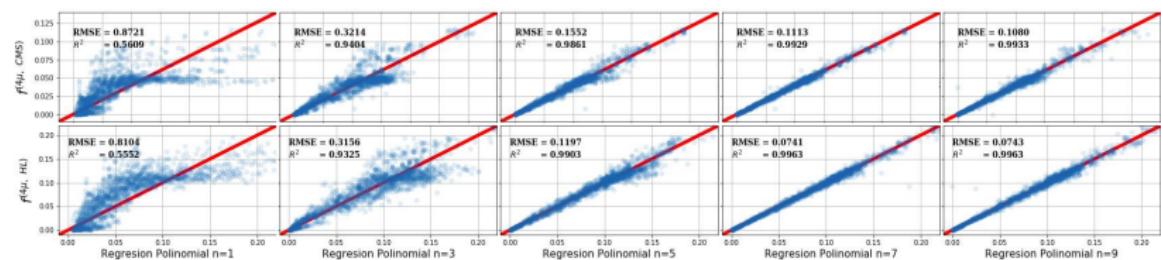


Figura: Resultados del ajuste de correlación para la regresión polinomial.

Eficiencia para fotón oscuro. Regresión.

2- Método de regresión con machine learning, aplicación módulo keras:

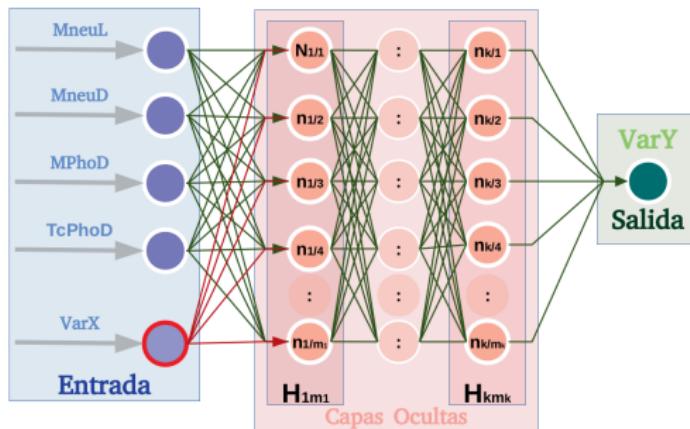
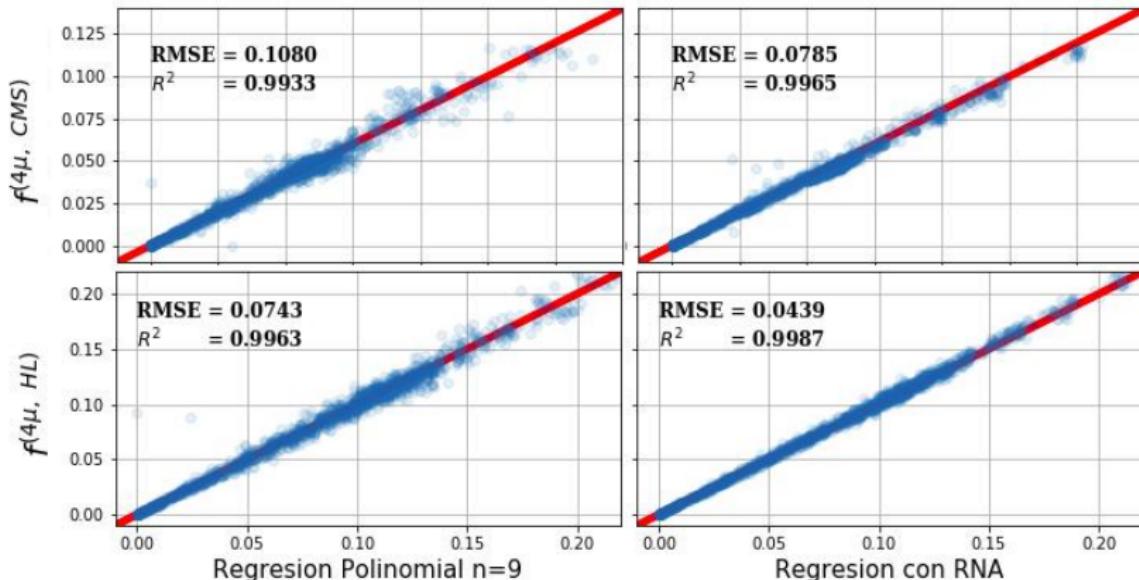


Figura: Diagrama de la estructura general de la red neuronal.

Para el caso de las eficiencias (VarY) este diagrama se adapta a 4 neuronas de entrada sin la variable VarX que es opcional.

Eficiencia para fotón oscuro. Regresión.

2- Método de regresión con machine learning, aplicación módulo keras:
Resultados y comparación:

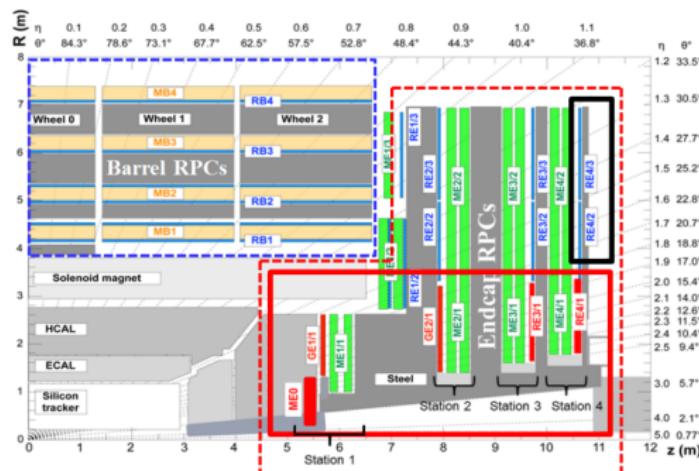


Etapa de Alta luminosidad para el Gran Colisionador de Hadrones

- El Gran Colisionador de Hadrones junto con sus experimentos principales estan en una etapa de actualizacion en preparacion para la etapa de alta luminosidad (2025-2035)
- En particular para la deteccion de muones se instalaran una serie de nuevos detectores que ampliaran el rango de deteccion, muy en particular para la region de pseudo-rapidez ($2.4 < |\eta| < 3.0$) como se muestra en el la imagen
- Estos nuevos detectores permitiran la identificacion de muones en esta region, y aumentaran la probabilidad de detectar señales como los fotones oscuros

Actualización del sistema de muones en el HL-LHC

- La actualización de basa en la instalación de nuevos detectores de muones
- Dicha detección amplia el rango de búsqueda para la posible detección de muones provenientes del fotón oscuro y otros modelos de física mas alla del modelo estándar



Comparacion distribuciones detector actual vs HL-LHC

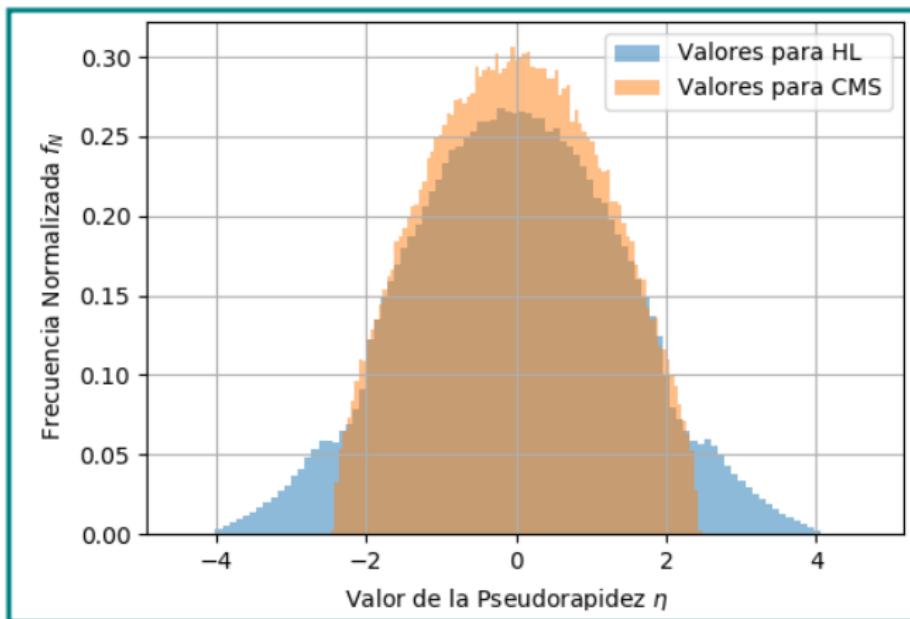


Figura: Comparar pseudorapidez.

Comparacion distribuciones detector actual vs HL-LHC

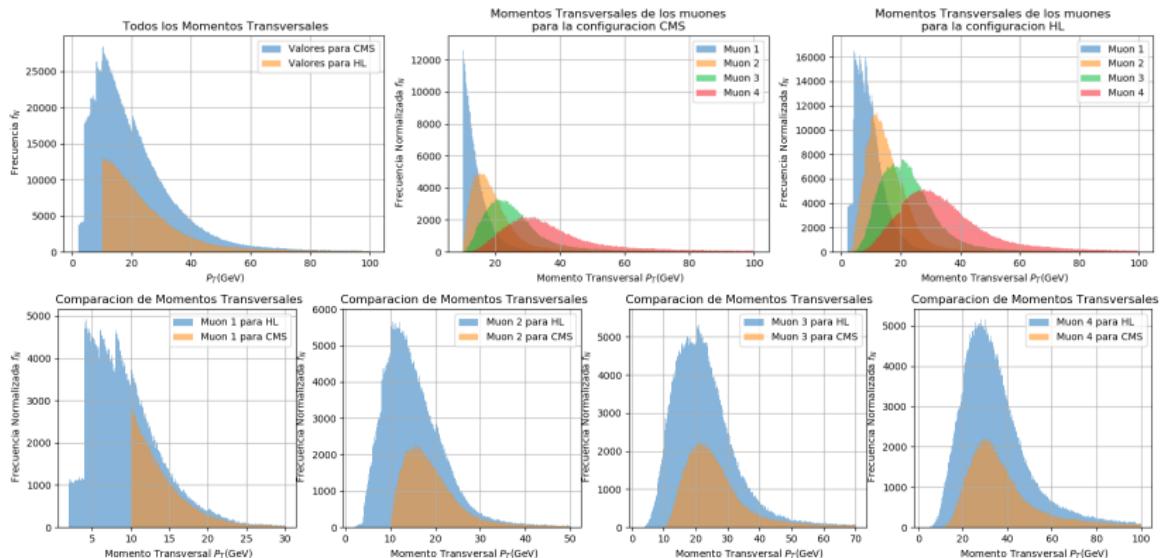


Figura: Comparar momentos.

Comparación de eficiencias detector actual vs HL-LHC.

- Las ventajas de las actualizaciones se ve reflejada como una aumento en la eficiencia de la señal
- La búsqueda del fotón oscuro durante el HL-LHC es uno de los objetivos fundamentales

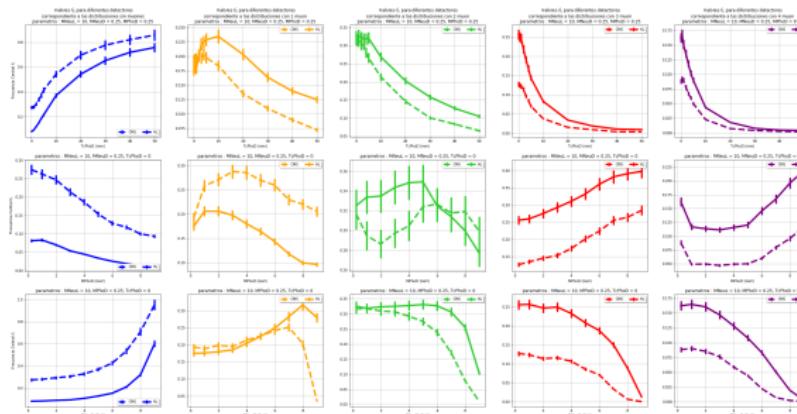


Figura: Comparación de eficiencias del detector actual vs HL-LHC para las diferentes muestras

Comparación de eficiencias detector actual vs HL-LHC.

- se logró una mejor estimación de la masa.

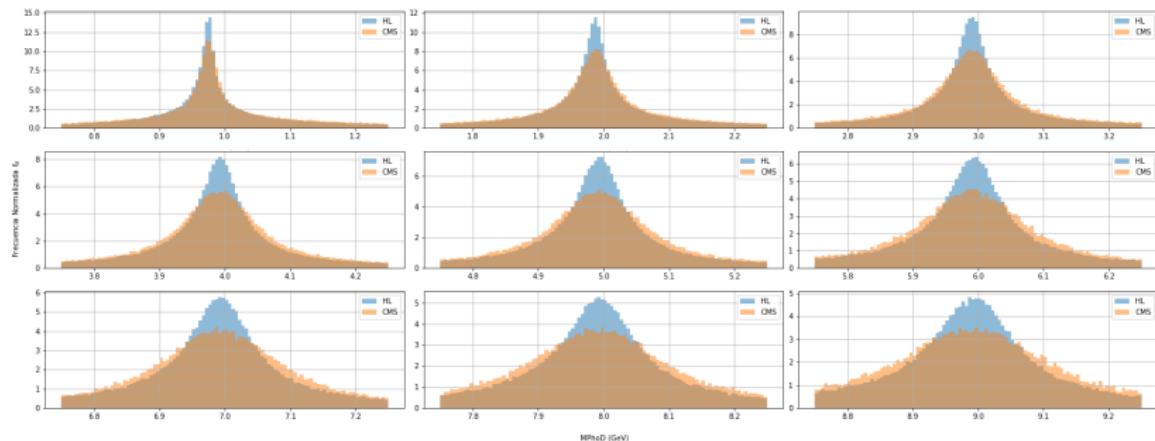


Figura: Comparación de la distribución normalizada de masas del fotón.

Resumen

- Se integró el modelo Dark-SUSY en un entorno de simulación
- Se desarrolló un entorno de simulación y análisis el cual usa los recursos computacionales de la Universidad de Sonora (ACARUS) para generar resultados
- Se estudió a detalle la señal característica de los fotones oscuros
- Se comparó la mejora en cuanto a eficiencia y rango de búsqueda en la reconstrucción de muones del detector actual respecto a la actualización en la etapa de alta luminosidad (HL-LHC) concluyendo que se tendrá en general $\sim 80\text{-}150\%$ más de reconstrucciones de interés para el fotón oscuro y un $\sim 12\text{-}19\%$ menos de errores en los valores de masa del fotón reconstruidos.

Siguientes Pasos

- Finalizar escritura de tesis (Finales de Junio)
- Distribuir primer draft a principios de Julio
- Presentar a finales de Julio o principios de Agosto