UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Doble Grado en Física y Matemáticas

CÓDIGO DEL TFG: 295-032-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Clasificación de sucesos de neutrino en el detector SBND mediante Análisis Topológico de Datos: Separación de neutrinos del electrón frente a piones neutros

Descripción general (resumen y metodología):

El experimento SBND (Short-Baseline Near Detector) de Fermilab utiliza tecnología de Cámaras de Proyección Temporal de Argón Líquido (LArTPC) para estudiar interacciones de neutrinos con una precisión sin precedentes. Uno de los mayores desafíos experimentales en la búsqueda de oscilaciones a neutrinos estériles es la identificación de neutrinos del electrón de corriente cargada. El principal fondo para esta señal proviene de la desintegración de piones neutros a dos fotones producidos en interacciones de corriente neutra. Debido a que la radiación electromagnética producida por electrones y fotones es muy similar, su separación requiere un análisis detallado de la topología del evento, prestando especial atención a la separación del vértice (el "gap" dejado por el fotón antes de convertirse en un par electrón-positrón) y la deposición de energía inicial.

Tradicionalmente, este problema se aborda mediante variables de reconstrucción cinemática o, más recientemente, con redes neuronales convolucionales que tratan el evento como una imagen. Sin embargo, las deposiciones de carga en un LArTPC forman intrínsecamente una nube de puntos tridimensional. Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) propone una aproximación novedosa y matemáticamente rigurosa para la separación entre electrones y fotones: el **Análisis Topológico de Datos (TDA)**.

Mediante el uso de la Homología Persistente, es posible estudiar la "forma" de los datos a múltiples escalas. Construyendo complejos simpliciales (como el complejo de Vietoris-Rips) sobre los impactos reconstruidos, el estudiante rastreará la evolución de características topológicas fundamentales, como las componentes conexas (relacionadas con el "gap" del fotón) o los agujeros (relacionados con la estructura de la lluvia electromagnética). Este enfoque permite extraer invariantes matemáticos (números de Betti y diagramas de persistencia) que servirán como variables robustas para clasificar los sucesos, uniendo la geometría algebraica y la topología computacional con la física de altas energías.

El trabajo comenzará con la selección y preprocesado de muestras simuladas por Montecarlo de interacciones en el detector SBND. A partir de los archivos de salida del marco de análisis oficial, la estudiante deberá extraer la información espacial y calorimétrica de los impactos reconstruidos (hits) en el interior de la cámara de proyección temporal. Esta fase inicial implica una transición de los formatos de datos de altas energías (típicamente orientados a objetos) hacia estructuras tabulares optimizadas para el cálculo matricial.

Una vez preparadas las nubes de puntos tridimensionales para cada suceso, se implementará el canal de Análisis Topológico de Datos. La estudiante aplicará algoritmos de filtración para construir complejos simpliciales iterativos y generar los diagramas de persistencia correspondientes a las lluvias de partículas. Dado que estos diagramas no pertenecen a un espacio vectorial tradicional, el siguiente paso metodológico será su vectorización mediante técnicas matemáticas (como persistence landscapes o persistence images). Finalmente, estas representaciones topológicas alimentarán un modelo de clasificación multivariado, cuyo rendimiento se evaluará calculando métricas de pureza y eficiencia. Los resultados se compararán rigurosamente con los métodos de discriminación estándar basados en la deposición de energía inicial, cuantificando así la ganancia aportada por la homología persistente.

Tipología: Estudio de casos, teóricos o prácticos, relacionados con la temática del Grado.

Objetivos planteados:

El objetivo principal es evaluar la viabilidad de la Homología Persistente para identificar la señal de electrones frente al fondo de fotones en un LArTPC. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- **(Física)** Comprender la fenomenología de las interacciones de neutrinos en argón líquido, enfocándose en las diferencias cinemáticas y de deposición de energía entre lluvias iniciadas por electrones y fotones.
- **(Matemáticas)** Estudiar los fundamentos teóricos del Análisis Topológico de Datos, incluyendo la definición de complejos simpliciales, grupos de homología y el cálculo de la Homología Persistente.
- **(Computación)** Implementar un algoritmo en Python (utilizando librerías como giotto-tda o scikit-tda) para extraer diagramas de persistencia a partir de nubes de puntos 3D correspondientes a eventos simulados en SBND.
- **(Análisis)** Desarrollar un modelo de clasificación simple basado en las características topológicas extraídas y cuantificar su eficiencia y pureza comparadas con la discriminación estándar basada en la deposición de energía inicial.

Bibliografía básica:

[1] - http://sbn-nd.fnal.gov/
[2] - P. Machado, O. Palamara, D. Schmitz, “The Short-Baseline Neutrino Program at Fermilab”, Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 69 (2019) 363-387. https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-nucl-101917-020949
[3] - M. Thomson, “Modern Particle Physics”. Cambridge University Press
[4] - Carlsson, G. (2009). Topology and Data. Bulletin of the American Mathematical Society, 46(2), 255-308
[5] - Edelsbrunner, H., & Harer, J. (2010). Computational Topology: An Introduction. American Mathematical Society
[6] - Chazal, F., & Michel, B. (2021). An Introduction to Topological Data Analysis: Fundamental and Practical Aspects for Data Scientists. Frontiers in Artificial Intelligence, 4, 108

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: BRUNO ZAMORANO GARCÍA

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA TEÓRICA

Correo electrónico: bzamorano@ugr.es

3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):

Nombre y apellidos:

Ámbito de conocimiento/Departamento:

Correo electrónico:

4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Nombre de la empresa o institución:

Dirección postal:

Puesto del tutor en la empresa o institución:

Centro de convenio Externo:

5. DATOS DEL ESTUDIANTE:

Nombre y apellidos: ELISA ZHANG

Correo electrónico: elisazhang@correo.ugr.es