UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Doble Grado en Física y Matemáticas

CÓDIGO DEL TFG: 295-036-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Violación de CP en el sector leptónico y Leptogénesis: Estudio estadístico de sensibilidad en el experimento DUNE

Descripción general (resumen y metodología):

Uno de los mayores misterios sin resolver en la cosmología moderna es la asimetría bariónica del universo (BAU): la abrumadora dominancia de la materia sobre la antimateria. La Leptogénesis proporciona un mecanismo sumamente elegante para explicar esta asimetría, postulando que una asimetría inicial en el sector leptónico —generada por la desintegración de neutrinos masivos dextrógiros en el universo primordial— fue posteriormente convertida en asimetría bariónica a través de procesos no perturbativos del Modelo Estándar (esfalerones).

Una condición necesaria (aunque no suficiente por sí sola) para que este mecanismo funcione es la existencia de violación de la simetría de carga-paridad (CP) en el sector leptónico. El experimento DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) tiene como objetivo principal medir esta violación mediante el estudio de las oscilaciones de (anti-)neutrino del muon a (anti-)neutrino del electrón lo largo de una línea base de 1300 km.

Sin embargo, determinar si el parámetro responsable de esta violación en la matriz PMNS es distinto de los valores que conservan CP (0 o 180º) no es una medida directa, sino un problema matemático complejo de inferencia estadística. La probabilidad de oscilación depende simultáneamente de múltiples parámetros (como los ángulos de mezcla de tres sabores y la jerarquía de masas), y está alterada por el efecto Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) debido al paso de los neutrinos por la materia terrestre. Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) combina una profunda revisión teórica de la conexión entre oscilaciones y leptogénesis con el desarrollo de un marco estadístico riguroso para evaluar la viabilidad del descubrimiento de la violación de CP en DUNE, resolviendo las degeneraciones paramétricas mediante la construcción de perfiles de verosimilitud (Profile Likelihood).

El proyecto se dividirá en dos fases. La primera será de carácter bibliográfico y analítico, donde el estudiante se familiarizará con la física de neutrinos masivos (mecanismo seesaw), las condiciones de Sakharov y el formalismo de oscilaciones. En esta fase, se derivarán las expansiones perturbativas de la probabilidad de oscilación en la materia, cruciales para entender cómo DUNE rompe las degeneraciones paramétricas.

La segunda fase será computacional y analítica. El estudiante no utilizará simulaciones completas del detector, sino que construirá un toy model estadístico partiendo de funciones de resolución y eficiencias parametrizadas. Se definirán las matrices de covarianza que incluyan incertidumbres sistemáticas (normalización de flujo y sección eficaz) utilizando enfoques frecuentistas. Con este modelo, calculará el contorno de exclusión de la fase de violación de CP.

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

Objetivos planteados:

El trabajo propone unir la cosmología teórica con la inferencia estadística aplicada, estructurándose en los siguientes objetivos:

- **(Física Teórica)** Estudiar el mecanismo de la leptogénesis térmica y su relación con la matriz de mezcla leptónica PMNS, analizando cómo la fase observable de violación de CP a bajas energías puede estar vinculada a las fases de violación de CP a altas energías.

- **(Física Fenomenológica)** Analizar analíticamente las probabilidades de oscilación en el vacío y en la materia para DUNE, identificando la degeneración entre la jerarquía de masas, el octante de del ángulo de mezcla 2-3 y la fase de violación de CP
- **(Matemáticas/Estadística)** Formular el problema de la sensibilidad a la violación de CP como un test de hipótesis riguroso. El alumno definirá y justificará estadísticamente el estadístico de prueba basado en la razón de verosimilitudes, aplicando el teorema de Wilks para establecer las regiones de confianza.
- **(Computación)** Desarrollar un modelo simplificado ("toy model") que genere conjuntos de datos Asimov correspondientes a los espectros esperados en DUNE, implementando la minimización numérica de la función de verosimilitud para obtener contornos de sensibilidad estadísticamente válidos.

Bibliografía básica:

[1] - **Fukugita, M., & Yanagida, T. (1986).** Baryogenesis without Grand Unification. Physics Letters B, 174(1), 45-47

[2] - **Davidson, S., Nardi, E., & Nir, Y. (2008).** Leptogenesis. Physics Reports, 466(4-5), 105-177

[3] - **Cowan, G., Cranmer, K., Gross, E., & Vitells, O. (2011).** Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics. The European Physical Journal C, 71(2), 1-19

[4] - **DUNE Collaboration (2020).** Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume II: DUNE Physics. arXiv:2002.03005

[5] - **Branco, G. C., et al. (2012).** Leptonic CP violation with and without flavor symmetry. Reviews of Modern Physics, 84(2), 515

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: JAVIER ANTONIO OLMEDO NIETO

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA TEÓRICA

Correo electrónico: javolmedo@ugr.es

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: PABLO FERRARO FLORIDO

Correo electrónico: pabloferrarof@correo.ugr.es