UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Grado en Física

CÓDIGO DEL TFG: 267-105-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Estudio de los modos radiales de cristales de Coulomb híbridos de dos iones en una trampa Penning

Descripción general (resumen y metodología):

Las trampas de Penning representan una de las herramientas más relevantes para la medida precisa de frecuencias de ciclotrón, magnitudes directamente relacionadas con la razón carga-masa de un ion **[1-4]**. Para mejorar la precisión de estas medidas, se ha propuesto una plataforma basada en un cristal de Coulomb híbrido formado por dos iones: uno de ellos, enfriado mediante radiación láser **[5,6]**, actúa como sensor, mientras que el segundo corresponde al ion de interés cuya frecuencia de ciclotrón se desea determinar **[7,8]**. Esta línea de investigación se desarrolla en el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada y se apoya en simulaciones numéricas basadas en la resolución de las ecuaciones de movimiento del sistema, incluyendo la interacción de Coulomb entre los iones, clave para alcanzar la máxima precisión en las medidas. En este Trabajo Fin de Grado se pretende revisar y adaptar a un entorno Python los códigos de simulación desarrollados por el grupo de investigación en el marco de una tesis doctoral **[9]**, con el fin de realizar simulaciones de cristales iónicos tanto en el régimen límite Doppler como en el estado fundamental. Asimismo, se prevé la participación del estudiante en algunas de las medidas experimentales destinadas a validar algunos de los resultados obtenidos mediante las simulaciones.

Metodología

1) Conocimiento de trampas de iones Penning y del enfriamiento láser de iones.
2) Estudio de la dinámica de un cristal de Coulomb de dos iones en una trampa Penning y de sus modos normales.
3) Revisión de los códigos de simulación de iones en trampas de Penning desarrollados por el grupo (en C++).
4) Adaptación de los códigos al entorno Python.
5) Familiarización con la plataforma experimental.
6) Desarrollo de herramientas de análisis de resultados y comparación con datos experimentales.

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

Objetivos planteados:

El primer objetivo de este Trabajo Fin de Grado es introducir al estudiante en los fundamentos físicos de las trampas Penning, el enfriamiento láser de iones y sus aplicaciones en metrología cuántica. En particular, se estudiará la dinámica de un cristal de Coulomb híbrido de dos iones, así como el papel de la interacción de Coulomb en este tipo de sistemas y su interés para medidas de precisión. El segundo objetivo es contribuir al desarrollo de herramientas de simulación numérica para la plataforma experimental del Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada que ayuden a interpretar los resultados. Para ello, el estudiante revisará y adaptará a Python códigos desarrollados previamente por el grupo, participando además en tareas de análisis de datos y comparación con resultados experimentales a un nivel adecuado para un Trabajo Fin de Grado.

Bibliografía básica:

[1] **Charged Particle Traps**, F. G. Major, V. N. Gheorghe, and G. Werth, Springer (2005).
[2] **Charged Particle Traps II**, G. Werth, V. N. Gheorghe, and F. G. Major, Springer (2009).

[3] **Geonium theory: Physics of a single electron or ion in a Penning trap**, L.S. Brown and G. Gabrielse, Reviews of Modern Physics 58 (1986) 233.
[4] **Scalable Arrays of Micro-Penning Traps for Quantum Computing and Simulati ,** S. Jain, J. Alonso, M. Grau and J. P. Home, Physical Review X 10 (2020) 031027.
[5] **Radiation-Pressure Cooling of Bound Resonant Absorbers**, D. J. Wineland, R. E. Drullinger, and F. L. Walls, Physical Review Letters 40 (1978) 1639.
[6] **Optical-Sideband Cooling of Visible Atom Cloud Confined in Parabolic Well,** W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. Toschek, and H. Dehmelt, Physical Review Letters 41 (1978) 233.
[7] **Dynamics of an unbalanced two-ion crystal in a Penning trap for application in optical mass spectrometry**, M. J. Gutiérrez, J. Berrocal, F. Domínguez, I. Arrazola, M. Block, E. Solano, and D. Rodríguez, Physical Review A 100 (2019) 063415.
[8] **Motional quantum metrology in a Penning trap**, J. Cerrillo and D. Rodríguez, Europhysics Letters-Perspective 134 (2021) 38001.
[9] **Studying an unbalanced two-ion crystal in a Penning trap: towards the quantum regime in high magnetic fields,** Manuel Jesús Gutiérrez Torres, Tesis doctoral, Universidad de Granada, 2021.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Se recomienda que el estudiante tenga conocimientos básicos de programación en C++ y Python o disposición para adquirirlos durante el desarrollo del trabajo.

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: DANIEL RODRÍGUEZ RUBIALES

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA ATÓMICA, MOLECULAR Y NUCLEAR

Correo electrónico: danielrodriguez@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: JUAN MANUEL MOLINA CARRILLO

Correo electrónico: jmmc26@correo.ugr.es