UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Grado en Física

CÓDIGO DEL TFG: 267-098-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Diseño de un sistema óptico para metrología cuántica en una trampa Penning criogénica

Descripción general (resumen y metodología):

Entre los sistemas de mayor interés actual en experimentos con trampas de iones destaca el ion de torio, ya que el isótopo ^{229}Th ha sido propuesto como candidato para el desarrollo de un reloj nuclear debido a la singular transición de muy baja energía presente en su núcleo **[1,2]**. Dado que los iones de $^{229}Th^{3+}$ son difíciles de enfriar directamente mediante láser **[3,4]** en una trampa Penning **[5,6]**, resulta necesario emplear técnicas de enfriamiento simpático utilizando un ion auxiliar enfriado por láser **[7]**. En la trampa Penning del Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada **[8]** se estudian cristales híbridos formados por un ion de $^{232}Th^{+}$ y un ion de Ca^{+}, con el objetivo de aplicar técnicas de enfriamiento simpático y metrología cuántica al ion de torio **[9]**. Para el desarrollo de estos experimentos, se construyó un sistema óptico de altas prestaciones **[10]**. Asimismo, recientemente se ha construido una nueva trampa criogénica cuyo objetivo final es mejorar las condiciones experimentales, reduciendo la presión residual y aumentando los tiempos de almacenamiento y coherencia del sistema. En este contexto, uno de los intereses actuales del laboratorio es avanzar en la puesta en marcha y caracterización de dicha trampa criogénica, para permitir el enfriamiento rápido de un ion de torio mediante una nube de iones enfriados por láser. Esto requiere un sistema óptico adicional, el diseño del acoplamiento entre esta trampa y la trampa de medida actual y el estudio del transporte adiabático de iones de torio con distintos estados de carga enfriados, para la formación eficiente del cristal híbrido en esta última.

Metodología

1) Conocimiento de las trampas de iones Penning y enfriamiento de iones con radiación láser (hasta el límite Doppler y estado fundamental). Enfriamiento simpático.
2) Conocimiento de metrología cuántica y la importancia del ^{229}Th como reloj óptico nuclear.
3) Revisión del trabajo previo realizado por el grupo.
4) Conocimiento de programas de simulación de vacío, óptica y transporte de iones.
5) Diseño de un nuevo sistema óptico e integración de este con la nueva trampa criogénica en la línea de trampas Penning del laboratorio, junto a la trampa actual.
6) Participación en experimentos de enfriamiento de un ion y de formación de cristales híbridos de dos iones hasta el estado fundamental en la trampa Penning actual.

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 y simpático de iones y las técnicas de metrología cuántica asociadas al ion $^{229}Th^{3+}$, propuesto como candidato para el desarrollo de un reloj óptico nuclear. En particular, el estudiante se familiarizará con la dinámica de cristales híbridos de dos iones y con los métodos experimentales utilizados para alcanzar regímenes próximos al estado fundamental. El segundo objetivo es formar al estudiante en las herramientas experimentales y de simulación empleadas en el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada. Para ello, se trabajará con programas de simulación de vacío, óptica y transporte de iones, así como en el diseño e integración de nuevos elementos a la nueva plataforma criogénica actualmente en desarrollo, incluyendo simulaciones de transporte adiabático de iones entre dos trampas. El tercer objetivo es contribuir, en el marco de una beca de

colaboración, a los experimentos desarrollados en el laboratorio relacionados con el enfriamiento simpático de iones de torio y la formación de cristales híbridos de dos iones en trampas Penning, participando además en tareas de análisis e interpretación de los resultados experimentales obtenidos.

Bibliografía básica:

[1] **Nuclear clocks for testing fundamental physics**, E. Peik, T. Schumm, M. S. Safronova, A. Pálffy, J. Weitenberg and P. G Thirolf, Quantum Science and Technology 6 (2021) 034002.

[2] **Laser Excitation of the Th-229 Nucleus**, J. Tiedau, M. V. Okhapkin, K. Zhang, J. Thielking, G. Zitzer, E. Peik, F. Schaden, T. Pronebner, I. Morawetz, L. Toscani De Col, F. Schneider, A. Leitner, M. Pressler, G. A. Kazakov, K. Beeks, T. Sikorsky and T. Schumm, Physical Review Letters 132, (2024) 182501.

[3] **Radiation-Pressure Cooling of Bound Resonant Absorbers**, D. J. Wineland, R. E. Drullinger, and F. L. Walls, Physical Review Letters 40 (1978) 1639.

[4] **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.

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

[6] **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.

[7] **Sympathetic cooling and detection of a hot trapped ion by a cold one**, M. Guggemos, D. Heinrich, O. A. Herrera-Sancho, R. Blatt and C. F. Roos, New Journal of Physics 17 (2015) 10300.

[8] **The TRAPSENSOR facility: an open-ring 7 tesla Penning trap for laser-based precision experiments**, M. J. Gutiérrez, J. Berrocal, J. M. Cornejo, F. Domínguez, J. J. Del Pozo, I. Arrazola, J. Bañuelos, P. Escobedo, O. Kaleja, L. Lamata, R. A. Rica, S. Schmidt, M. Block, E. Solano and D. Rodríguez., New Journal of Physics 21 (2019) 023023.

[9] **Motional quantum metrology in a Penning trap**, J. Cerrillo and D. Rodríguez, Europhysics Letters-Perspective 134 (2021) 38001.

[10] **High-performance in-vacuum optical system for quantum optics experiments in a Penning-trap**, J. Berrocal and D. Rodríguez, European Physical Journal in Quantum Technologies 12 (2025) 58.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Se recomienda que el estudiante tenga conocimientos básicos de programación en Python o disposición para adquirirlos durante el desarrollo del trabajo. Se recomienda también revisión de conceptos de óptica.

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: MARCOS MARIA MARTINEZ FERNANDEZ

Correo electrónico: marcosmaria@correo.ugr.es