



1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Protocolos de naturaleza cuántica para experimentos de precisión con un cristal de Coulomb

Descripción general (resumen y metodología):

La precisión en medidas fundamentales con trampas de iones requiere la mínima energía del ion. En el caso más extremo esto es llevar al ion al estado fundamental de cualquiera de los pozos de potencial asociados a cada uno de los llamados movimientos propios del ion **[1-3]**. Aunque esto se puede llevar a cabo con radiación láser de distinta naturaleza, no todos los iones pueden interaccionar con radiación láser por lo que estudiar algunos de ellos requiere un ion auxiliar. Esto ocurre por ejemplo en relojes ópticos con iones de aluminio **[4]**. En este caso, una técnica de naturaleza cuántica permite, a partir de un ion auxiliar observar el ion que se desea estudiar, gracias a que se genera un acoplamiento entre ambos iones originando un cristal de Coulomb híbrido de dos iones (ver por ejemplo la Ref. **[5]**). En la trampa Penning del Laboratorio de Trampas Iones y Láseres de la UGR **[6]**, generamos un cristal híbrido con un ion de $^{232}\text{Th}^+$ (a estudiar) y un ion de $^{40}\text{Ca}^+$ (ion auxiliar). En este Trabajo Fin de Grado se pretende explorar dicho acoplamiento en el régimen cuántico y estudiar cómo afecta la interacción a las frecuencias de los modos con el fin de llevar a cabo Quantum mass spectroscopy **[7]**. Estos experimentos con $^{232}\text{Th}^+$ son importantes para extender esta técnica a un ion de ^{229}Th propuesto como reloj nuclear **[8]**.

Metodología

- 1) Conocimiento de trampas de iones tipo Paul y Penning y enfriamiento láser (hasta el límite Doppler y hasta el estado fundamental).
- 2) Conocimiento de relojes ópticos basados en espectroscopia de puertas lógicas.
- 3) Conocimiento de la técnica Quantum Mass Spectroscopy desarrollada por el grupo en Granada.
- 4) Conocimiento de la importancia del ^{229}Th como potencial reloj nuclear.
- 5) Mecanismos de producción de torio y aumento de la carga electrónica.
- 6) Realización de experimentos de enfriamiento láser con un cristal $^{232}\text{Th}^+ - ^{40}\text{Ca}^+$ y análisis e interpretación de los resultados.

Tipología: Trabajos experimentales, de toma de datos de campo o de laboratorio.

Objetivos planteados:

El primer objetivo es formar al estudiante en aspectos básicos de trampas de iones, enfriamiento láser y metrología cuántica, lo que supone la interacción de Coulomb en este tipo de experimentos con dos iones distintos y la razón por la que se estudia torio. El segundo objetivo de este trabajo es avanzar en la implementación de protocolos de naturaleza cuántica en la trampa Penning del Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la UGR. Para ello el alumno participará en experimentos y análisis de datos a un nivel apropiado para un Trabajo Fin de Grado. Se trabajará para que un objetivo específico se centre en el enfriamiento indirecto (hasta el estado fundamental) de modos por acoplamiento con campos externos, algo que por la configuración del experimento es necesario.

Bibliografía básica:

- [1] **Proposed $10^{14} \Delta \nu < \nu$ Laser Fluorescence Spectroscopy on Ti^+ Mono-Ion Oscillator**, D. J. Wineland, and H. Dehmelt, Bulletin of the American Physical Society 20 (1975) 637.
- [2] **Radiation-Pressure Cooling of Bound Resonant Absorbers**, D. J. Wineland, R. E. Drullinger, and F. L. Walls, Physical Review Letters **40** (1978) 1639.

- [3] **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.
- [4] **Spectroscopy Using Quantum Logic**, P.O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist, and D. J. Wineland, Science 309 (2005) 749.
- [5] **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.
- [6] <https://trapsensor.ugr.es>
- [7] **Motional quantum metrology in a Penning trap**, J. Cerrillo and D. Rodríguez, Europhysics Letters-Perspective 134 (2021) 38001.
- [8] **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.

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Se recomienda al estudiante adquirir formación de programación en Python (en caso de no tenerla).

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: ANTONIO MIGUEL ROMERO RODRIGUEZ

Correo electrónico: miguelrom19@correo.ugr.es