UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Grado en Física

CÓDIGO DEL TFG: 267-120-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Tiempo de coherencia de un ion y de un cristal de dos iones en una trampa Paul lineal

Descripción general (resumen y metodología):

En los experimentos cuánticos basados en trampas de iones, el tiempo de coherencia del qubit constituye un elemento clave para la realización de operaciones de control y medidas de precisión **[1,2]**. La coherencia del sistema depende tanto de las condiciones experimentales como de la estabilidad y pureza espectral de la radiación láser empleada para excitar la transición reloj o qubit del ion, especialmente una vez alcanzado el régimen de enfriamiento cercano al estado fundamental. En el Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada **[3]** se pretende desarrollar experimentos de espectroscopia Rabi y Ramsey sobre diferentes isótopos de calcio en una trampa Paul lineal, en línea con trabajos previos descritos en **[4-6]**. Uno de los principales objetivos experimentales es minimizar la anchura de línea de la radiación utilizada en la transición reloj, reduciendo efectos como el micromovimiento residual, las fluctuaciones del campo magnético y, especialmente, el ruido introducido durante la transmisión de la radiación láser a través de fibras ópticas **[7]**. La influencia de este ruido puede estudiarse experimentalmente mediante medidas de oscilaciones de Rabi y, de manera particularmente sensible, a través de espectroscopia Ramsey **[4]**. Para este tipo de medidas también se empleará un peine de frecuencias ópticas **[8]**.

Metodología

1) Introducción a las trampas Paul y al enfriamiento láser de iones, desde el límite Doppler hasta el estado fundamental.
2) Familiarización con la plataforma experimental y realización de medidas de oscilaciones de Rabi.
3) Estudio de técnicas de espectroscopia Ramsey y de medida de frecuencias mediante un peine de frecuencias ópticas. Análisis de resultados.
4) Análisis de los efectos que limitan la anchura de línea de la transición reloj o qubit.
5) Participación en tareas de implementación de un sistema de cancelación del ruido introducido por la transmisión de la radiación láser mediante fibra óptica.
6) Participación en medidas del tiempo de coherencia tras la implementación del sistema de cancelación de ruido.

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 una trampa Paul, el enfriamiento láser de iones y las técnicas básicas de control utilizadas en experimentos de metrología cuántica. En particular, el estudiante se familiarizará con medidas de oscilaciones de Rabi y técnicas de espectroscopia Ramsey para la caracterización de transiciones reloj en iones atrapados. El segundo objetivo es participar en la caracterización experimental de los mecanismos que limitan el tiempo de coherencia y la anchura de línea de la transición qubit o reloj en la plataforma experimental del Laboratorio de Trampas de Iones y Láseres de la Universidad de Granada. Para ello, se estudiarán distintos efectos de ruido presentes en el sistema y se colaborará en tareas relacionadas con la cancelación del ruido introducido por la transmisión de la radiación láser mediante fibra óptica, así como en el análisis de los resultados obtenidos.

Bibliografía básica:

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

[2] **Quantum dynamics of single trapped ions**, D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, Reviews of Modern Physics 75 (2003) 281.

[3] http://trapsensor.ugr.es

[4] **Absolute Frequency Measurement of the ^{40}Ca 4s^{2}S$_{1/2}$ - 3d^{2}D$_{5/2}$ Clock Transition**, M. Chwalla, J. Benhelm, K. Kim, G. Kirchmair, T. Monz, P. Schindler, A. Villar, W. Hänsel, C. F. Roos, R. Blatt, M. Abgrall, G. Santarelli, Y. Le Coq, Ph. Laurent, P. Lemonde, and P. Wolf, Physical Review Letters **102** (2009) 023002.

[5] **Direct comparison of a Ca$^+$ single-ion clock against a Sr lattice clock to verify the absolute frequency measurement,** K. Matsubara, H. Hachisu, Y. Li, S. Nagano, C. Locke, A. Nogami, M. Kajita, K. Hayasaka, T. Ido, and M. Hosokawa, Optics Express 20 (2012) 22034.

[6] **Frequency comparison of two ^{40}Ca$^+$ optical clocks with 10^{-17}-level stability**, Y. Huang, H. Guan, W. Bian, L. Ma, K. Liang, T. Li, and K. Gao, Applied Physics B 123 (2017) 166.

[7] **Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path**, L.-S. Ma, P. Jungner, J. Ye, and J. L. Hall, Optics Letters 19 (1994) 1777.

[8] **Optical frequency metrology**, Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, Nature 416 (2002) 233.

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.

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: GONZALO FERNANDEZ ROMERO

Correo electrónico: gonzalofdezrom@correo.ugr.es