UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta TFG. Curso 2026/2027

GRADO: Grado en Física

CÓDIGO DEL TFG: 267-015-2026/2027

1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Dinámica y fenómenos de no equilibrio en sistemas cuánticos abiertos

Descripción general (resumen y metodología):

Resumen

Los sistemas cuánticos abiertos constituyen el marco teórico adecuado para describir sistemas cuánticos que interactúan con un entorno externo. Dado que ningún sistema físico real está completamente aislado, el estudio de los efectos del entorno resulta fundamental para comprender fenómenos como la disipación, la decoherencia y la relajación hacia estados estacionarios. Estos procesos desempeñan un papel esencial en áreas tan diversas como la información cuántica, la óptica cuántica, la física de la materia condensada y las tecnologías cuánticas emergentes.

La dinámica de los sistemas cuánticos abiertos se describe habitualmente mediante ecuaciones maestras de tipo Lindblad, en las que la influencia del entorno queda codificada a través de operadores de salto cuántico. Este formalismo presenta importantes analogías con los procesos estocásticos clásicos, permitiendo trasladar a la física cuántica muchas herramientas desarrolladas originalmente en física estadística fuera del equilibrio.

En este trabajo se estudiarán diversos ejemplos paradigmáticos de sistemas cuánticos abiertos. En una primera etapa se analizará la dinámica de un sistema de dos niveles (qubit) sometido a disipación, tanto a temperatura cero como a temperatura finita. Posteriormente se extenderá el análisis al oscilador armónico cuántico disipativo, que constituye uno de los modelos fundamentales de la teoría de sistemas cuánticos abiertos. En ambos casos se investigarán los mecanismos de relajación, decoherencia y termalización inducidos por el entorno, así como la conexión entre las descripciones cuántica y clásica de la dinámica disipativa.

Metodología

El trabajo combinará herramientas analíticas y numéricas para el estudio de sistemas cuánticos abiertos. En primer lugar se construirá el formalismo de la ecuación maestra de Lindblad y se analizará la estructura espectral de los correspondientes superoperadores de evolución. A partir de dicha diagonalización se determinarán los estados estacionarios y las escalas temporales características de relajación.

Complementariamente, se implementarán simulaciones numéricas mediante el método de Monte Carlo de saltos cuánticos (Quantum Jump Monte Carlo Method), que permite interpretar la dinámica de sistemas abiertos como un conjunto de trayectorias estocásticas de estados puros. La comparación entre ambas aproximaciones permitirá comprender la relación entre la descripción microscópica de las trayectorias individuales y la evolución de la matriz densidad.

Las simulaciones se desarrollarán utilizando herramientas computacionales basadas en Python y bibliotecas especializadas para sistemas cuánticos abiertos, permitiendo visualizar la evolución temporal de observables físicos, poblaciones, coherencias y distribuciones de probabilidad.

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

Objetivos planteados:

Objetivos planteados

1. Estudiar el formalismo de la ecuación maestra de Lindblad y su relación con los procesos estocásticos clásicos.
2. Analizar la dinámica de un qubit disipativo a temperatura cero mediante la diagonalización exacta del superoperador de Lindblad y la simulación de trayectorias cuánticas.

3. Extender el análisis al caso de temperatura finita, incorporando procesos de absorción y emisión inducidos por un entorno térmico, y estudiar la relajación hacia estados térmicos de equilibrio.
4. Estudiar el oscilador armónico cuántico disipativo como ejemplo fundamental de sistema cuántico abierto, analizando la evolución de estados coherentes, la disipación de energía y los procesos de decoherencia.
5. Comparar los resultados obtenidos con las predicciones de los modelos clásicos correspondientes, en particular el oscilador armónico amortiguado y los procesos de relajación clásicos, identificando similitudes y diferencias entre ambos regímenes.

Bibliografía básica:

Bibliografía básica

1. Breuer, H.-P., & Petruccione, F. The Theory of Open Quantum Systems. Oxford University Press, 2002.
2. Gardiner, C. W., & Zoller, P. Quantum Noise. Springer, 2004.
3. Plenio, M. B., & Knight, P. L. "The quantum-jump approach to dissipative dynamics in quantum optics". Reviews of Modern Physics 70, 101–144 (1998).
4. Carmichael, H. J. An Open Systems Approach to Quantum Optics. Springer, 1993.
5. Garrahan, J. P. "Aspects of non-equilibrium in classical and quantum systems: Slow relaxation and glasses, dynamical large deviations, quantum non-ergodicity, and open quantum dynamics". Physica A 504, 130–154 (2018).
6. Johansson, J. R., Nation, P. D., & Nori, F. "QuTiP 2: A Python framework for the dynamics of open quantum systems". Computer Physics Communications 184, 1234–1240 (2013).

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: CARLOS PÉREZ ESPIGARES

Ámbito de conocimiento/Departamento: FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

Correo electrónico: carlosperez@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. <u>DATOS DEL ESTUDIANTE</u>:

Nombre y apellidos: JAVIER RODRIGUEZ URBANO

Correo electrónico: javifisica@correo.ugr.es