

MÁSTER EN FÍSICA

CURSO 2024/25

9 TEMAS DE TRABAJO FIN DE MÁSTER PROPUESTOS

EN LA MENCIÓN DE

FÍSICA MATEMÁTICA

Nº de TFM	Título	Tutor/es	Resumen y objetivos
1	Cavidades cuánticas como mecanismo de Control de Qubits Topológicos	Fernando Javier Gómez Ruiz	[ENLACE]
2	Mecanismo de Kibble-Zurek en Sistemas no homogéneos	Fernando Javier Gómez Ruiz	[ENLACE]
3	Estadística de errores en un ordenador cuántico	Fernando Javier Gómez Ruiz	[ENLACE]
4	Detección de contaminantes atmosféricos causados por la reentrada de satélites en la atmósfera terrestre	Guillermo López Reyes, Roberto Román Díez	[ENLACE]
5	Algoritmos de larga escala para distribución cuántica de claves	Mateus de Araújo Santos, Luis Miguel Nieto Calzada	[ENLACE]
6	Estudio y construcción de espacio-tiempos no-conmutativos y modelos de gravedad cuántica	Javier Negro Vadillo Iván Gutiérrez Sagredo	[ENLACE]
7	Control de Qubits (bits cuánticos) a través de campos electromagnéticos en cavidades	Iván Alejandro Bocanegra Garay, Luis Miguel Nieto Calzada	[ENLACE]
8	Simulaciones de trayectorias nulas alrededor de objetos compactos con simetría axial	Diego Sáez-Chillón Gómez	[ENLACE]
9	Problemas de frontera en gravedad dilatónica	Fernando Ruiz Ruiz (U. Complutense de Madrid), José Manuel Izquierdo Rodríguez	[ENLACE]

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 1

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Cavidades cuánticas como mecanismo de Control de Qubits Topológicos
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Fernando Javier Gómez Ruiz Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática – MathPhys-UVa e-mail de contacto: fernandojavier.gomez@uva.es
<p>Resumen y objetivos del TFM:</p> <p>La computación cuántica topológica es una vanguardista rama de la computación cuántica que busca aprovechar las propiedades exóticas de ciertas partículas cuánticas para realizar cálculos de manera más robusta y eficiente. A diferencia de las computadoras cuánticas tradicionales que utilizan qubits, las computadoras cuánticas topológicas emplean quasipartículas llamadas anyones. Las propiedades topológicas de estas partículas permiten que la información cuántica sea más resistente a los errores causados por el ruido y las perturbaciones externas, lo que podría superar uno de los mayores desafíos en el desarrollo de la computación cuántica práctica. En esencia, la computación cuántica topológica promete abrir nuevas fronteras en la capacidad de resolver problemas complejos, revolucionando campos como la criptografía, la simulación de materiales y la optimización.</p> <p>En este trabajo se propone estudiar y caracterizar las propiedades cuánticas emergentes cuando una cadena de Kitaev, que soporta qubits topológicos, es inmersa en una cavidad cuántica electromagnética. Para esto, se estudiarán desde el punto de vista tanto teórico como numérico, propiedades tales como la regla de fusión de anyones, el braiding o intercambio, y los modos cero de Majorana.</p> <p>Objetivos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un estudio sistemático de los sistemas de interacción radiación-materia como banco de pruebas para la computación cuántica topológica. 2. Implementar simulaciones numéricas que describan la dinámica de sistemas de Kitaev en una cavidad electromagnética. 3. Analizar el régimen de parámetros que permiten simular braiding de Majorana. 4. Proponer un modelo teórico que explique la fenomenología de los experimentos numéricos. 	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 2

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Mecanismo de Kibble-Zurek en Sistemas no homogéneos
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Fernando Javier Gómez Ruiz Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática – MathPhys-UVa e-mail de contacto: fernandojavier.gomez@uva.es
<p>Resumen y objetivos del TFM:</p> <p>En los años 70, Tom W. B. Kibble y Wojciech H. Zurek propusieron de manera independiente cómo la dinámica de una transición de fase continua puede dar lugar a la formación de estructuras tanto en el universo primitivo como en sistemas de materia condensada. Este desarrollo es conocido hoy como el mecanismo de Kibble-Zurek y es un paradigma en la física de no equilibrio.</p> <p>Cerca de una transición de fase continua o cuántica, propiedades como la longitud de correlación y el tiempo de relajación de un sistema divergen siguiendo una ley de potencias, gobernada por un exponente crítico. La teoría del grupo de renormalización demuestra que distintos sistemas pueden exhibir la misma divergencia, clasificándolos en familias de universalidad.</p> <p>El mecanismo de Kibble-Zurek explota esta universalidad y la dinámica no adiabática cercana a la transición de fase. En escenarios de ruptura de simetría espontánea, se forman dominios con configuraciones de igual energía, y en las interfaces entre estos dominios surgen defectos topológicos, como paredes frontera en ferromagnetos o vórtices en superfluidos y superconductores. La predicción del mecanismo es que el número promedio de estos defectos sigue una ley de potencias con el ritmo de la transición de fase. Casi medio siglo después, esta predicción ha sido confirmada por numerosos experimentos, simulaciones y cálculos teóricos.</p> <p>En este trabajo de Maestría, se propone extender las predicciones teóricas de la estadística de defectos topológicos en sistemas no homogéneos. Para esto se modela sistema físico que sigue una dinámica estocástica tipo Langevin. Se estudiarán las leyes de escala de la distribución de defectos topológicos como el espaciado de defectos en estos sistemas. Este trabajo tiene una componente numérica fuerte.</p> <p>Objetivos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Crear códigos computacionales para la solución de ecuaciones diferenciales acopladas estocásticas. 2. Mediante simulaciones numéricas modelar la dinámica de no equilibrio de un sistema concreto que sigue una dinámica tipo Langevin. 3. Estudiar la distribución de defectos topológicos y de espaciado de los mismos en sistemas no homogéneos. 4. Desde la física estadística proponer un modelo teórico explicativo a los resultados de los experimentos teóricos. 	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 3

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Estadística de errores en un ordenador cuántico
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Fernando Javier Gómez Ruiz Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática – MathPhys-UVa e-mail de contacto: fernandojavier.gomez@uva.es

Resumen y objetivos del TFM:

La computación cuántica adiabática ofrece un enfoque prometedor para resolver problemas de optimización a través de la dinámica cuántica generada por un Hamiltoniano dependiente del tiempo. Los annealers cuánticos más avanzados son un ejemplo de dispositivos cuánticos intermedios ruidosos, en los que la dinámica no se espera que sea completamente unitaria debido a diversas fuentes de ruido que provocan decoherencia. La decoherencia es ampliamente reconocida como la responsable de la transición de sistemas cuánticos a comportamientos clásicos, lo que limita el potencial de las computadoras cuánticas para superar a sus contrapartes clásicas y demostrar una ventaja cuántica.

Por otra parte, el mecanismo de Kibble-Zurek es un paradigma exitoso para describir la dinámica de transiciones de fase, tanto térmicas como cuánticas. Es una de las pocas herramientas teóricas capaces de explicar el comportamiento fuera del equilibrio en términos de propiedades de equilibrio. El mecanismo predice que, al atravesar una transición de fase continua, se genera una densidad de defectos topológicos que sigue una ley de escalado universal en función del tiempo de enfriamiento.

Recientemente, ha surgido la noción de una física “Más allá del Mecanismo de Kibble-Zurek”, un nuevo enfoque cuya principal predicción es que la distribución del número de defectos topológicos se caracteriza por una distribución binomial universal. Como resultado, se observa un escalado universal con ley de potencias en todos los cumulantes, con el mismo exponente que predice el mecanismo de Kibble-Zurek para el valor medio. Esta distribución de defectos topológicos puede correlacionarse directamente con la distribución de errores en un annealer cuántico.

En este Trabajo de Fin de Máster se pretende estudiar el impacto en la distribución de errores cuando el parámetro de control varía según una ley de potencias. Además, se implementarán simulaciones numéricas que consideren el efecto de la temperatura en estos ordenadores cuánticos.

Objetivos:

1. Desarrollar códigos computacionales para resolver ecuaciones diferenciales acopladas.
2. Modelar la dinámica fuera del equilibrio de un sistema de spins mediante simulaciones numéricas.
3. Estudiar la distribución de errores y su espaciado.
4. Proponer un modelo teórico desde la física estadística para explicar los resultados obtenidos en los experimentos numéricos.

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 4

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Detección de contaminantes atmosféricos causados por la reentrada de satélites en la atmósfera terrestre
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Guillermo López y Roberto Román Dptos. de Física Aplicada y Física Teórica, Atómica y Óptica Grupo ERICA (Espectroscopia Raman e Infrarroja aplicada a Cosmogeología y Astrobiología) y Grupo de Óptica Atmosférica (GOA) e-mail de contacto: guillermo.lopez@uva.es , roberto.roman@uva.es
Resumen y objetivos del TFM:	
<p>El número de satélites en órbita terrestre está en continuo aumento en gran medida gracias a las varias mega-constelaciones que se están lanzando al espacio, aumentando necesariamente el número de reentradas de satélites fuera de servicio. Es conocido que los satélites en su reentrada se desintegran en su mayor parte, depositando cantidades no despreciables de nanopartículas de óxidos metálicos como TiO_2 o Al_2O_3, acompañados de otros gases como NO y CO_2. Estos óxidos metálicos funcionan como catalizadores para reacciones de destrucción del ozono, y persisten en la atmósfera durante décadas. El objetivo de este trabajo consistirá en la realización de análisis de laboratorio con un novedoso sensor de gases desarrollado por el GIR ERICA, para evaluar la capacidad de este sensor de realizar medidas representativas con diferentes concentraciones de gases y contaminantes. Este trabajo, con una gran carga experimental, permitirá evaluar la capacidad de este sensor de realizar análisis que puedan facilitar la detección y potencial cuantificación de contaminantes en la atmósfera terrestre, relacionados con la reentrada de satélites tras completar su ciclo de vida.</p>	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 5

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Algoritmos de larga escala para distribución cuántica de claves
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Mateus de Araújo Santos y Luis Miguel Nieto Calzada Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática – MathPhys-UVa e-mail de contacto: mateus.araujo@uva.es , luismiguel.nieto.calzada@uva.es
Resumen y objetivos del TFM:	
<p>La distribución cuántica de claves permite a dos personas generar una clave criptográfica segura a larga distancia. La clave así obtenida es utilizada en algoritmos de cifrado como libreta de un solo uso. La seguridad está basada en propiedades fundamentales de la mecánica cuántica, que permiten detectar la presencia de un espía por el ruido que él introduce. Cuando se hace distribución cuántica de claves experimentalmente, hay que hacer un <i>análisis del peor caso</i> y asumir que todo ruido que se encuentra es generado por un espía, o que baja la velocidad de generación de claves.</p> <p>La principal dificultad en desarrollar un protocolo de distribución cuántica de claves es hacer ese análisis del peor caso que, en general, solamente es posible de manera numérica. Avances recientes en teoría de optimización han permitido el desarrollo de nuevos algoritmos para ese problema, que lo solucionan de manera rápida y precisa. Sin embargo, estos algoritmos necesitan de una gran cantidad de memoria RAM, lo que restringe su aplicabilidad a protocolos que utilizan sistemas cuánticas de dimensión relativamente baja.</p> <p>En ese trabajo se implementará un nuevo algoritmo basado en el <i>alternating directions method of multipliers</i> (ADMM), que es apropiado para solucionar problemas de larga escala. El método necesita de muy poca RAM, pero suele obtener resultados con precisión más baja que los algoritmos existentes. Se comparará el desempeño con los algoritmos existentes, y se hará el análisis de protocolos de distribución cuántica de claves en regímenes que hoy son imposibles.</p>	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 6

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Estudio y construcción de espacio-tiempos no-conmutativos y modelos de gravedad cuántica
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Javier Negro Vadillo e Iván Gutiérrez Sagredo Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática – MathPhys-UVa, MatPhys-UBu e-mail de contacto: jnegro@uva.es , igsagredo@ubu.es
Resumen y objetivos del TFM:	
<p>Las álgebras no-conmutativas de operadores espacio-temporales han sido extensamente estudiadas como modelos fenomenológicos de la estructura del espacio-tiempo a la escala de Planck, una idea que se remonta a los trabajos pioneros de Snyder en 1947. En concreto, aquellos modelos que son covariantes bajo ciertos grupos cuánticos de isometrías espacio-temporales son especialmente interesantes debido a la información extra que aportan.</p> <p>En particular, los grupos de Lie cinemáticos de transformaciones del espacio tiempo tanto relativistas (grupos de de Sitter $SO(4,1)$, Anti-de Sitter $SO(3,2)$ y de Poincaré $ISO(3,1)$) como no relativistas (grupos de Galileo, Newton-Hooke y Carroll) permiten construir los respectivos espacio-tiempos como espacios homogéneos $M=G/H$ donde H es el subgrupo de isotropía correspondiente. Como es bien conocido, esto sigue siendo cierto cuando las álgebras de funciones sobre ellos se cuantizan manteniendo la estructura de álgebra de Hopf.</p>	
Objetivos:	
<ul style="list-style-type: none"> - Comprensión de los conceptos físicos que subyacen a la modelización del espacio-tiempo a la escala de Planck en términos de álgebras de operadores no conmutativas. - Estudio de las técnicas geométricas necesarias relacionadas con grupos de Poisson-Lie y espacios homogéneos de Poisson coisótopos. - Estudio de las técnicas algebraicas necesarias relacionadas con grupos cuánticos y álgebras no conmutativas. - Estudio en detalle de un modelo de espacio-tiempo no conmutativo y de su álgebra de Hopf de simetrías. - Intentar generalizar el anterior modelo al caso de una constante cosmológica diferente de cero (grupos de de Sitter $SO(4,1)$, Anti- de Sitter $SO(3,2)$) y analizar sus principales implicaciones físicas. 	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 7

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Control de Qubits (bits cuánticos) a través de campos electromagnéticos en cavidades
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Iván Alejandro Bocanegra Garay y Luis Miguel Nieto Calzada Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática – MathPhys-UVa e-mail de contacto: ivanalejandro.bocanegra@uva.es
Resumen y objetivos del TFM:	
<p>Resumen: Se desea llevar a cabo el análisis de las propiedades y cantidades físicas relacionadas con interacciones entre sistemas de dos niveles (bits cuánticos, qubits) y campos electromagnéticos en cavidades (cQED) con miras a aplicaciones relacionadas con información cuántica, control cuántico, comunicaciones cuánticas y computación cuántica, entre otras.</p>	
Objetivos:	
<p>General: Se desea solucionar la ecuación de Schrödinger para un sistema del tipo (Anti-)Jaynes-Cummings, de manera analítica (exacta) y numérica, para proceder a obtener cantidades físicas de interés del sistema total (qubit+campo), así como de los respectivos subsistemas. Se analizará el control de la respuesta de dichas cantidades mediante la variación de los parámetros involucrados, para la obtención de estados cuánticos con características específicas.</p>	
Objetivos Particulares:	
<ul style="list-style-type: none"> • Solución de la ecuación de Schrödinger para el Hamiltoniano tipo Anti-Jaynes-Cummings (que considera los llamados términos contra-rotantes), mediante la técnica de supersimetría: solución analítica (exacta). • Solución de la ecuación de Schrödinger para el Hamiltoniano tipo Anti-Jaynes-Cummings mediante el uso de herramientas de cálculo numérico (Python). • Cálculo de valores esperados (de los observables de interés) del sistema a partir de las soluciones (analíticas y/o numéricas). • Variación de los parámetros involucrados para la manipulación (ingeniería) de los estados cuánticos. • Creación de material (gráficos 2D, 3D, etc., en Python, por ejemplo) que permita el adecuado análisis de los resultados obtenidos. 	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 8

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Simulaciones de trayectorias nulas alrededor de objetos compactos con simetría axial
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Diego Sáez-Chillón Gómez Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica GIR Física Matemática - MathPhys-UVa e-mail de contacto: diego.saez@uva.es
Resumen y objetivos del TFM: Este trabajo está enfocado en el desarrollo de simulaciones de trayectorias nulas en geometrías del espacio-tiempo con simetría axial y la apariencia asintótica de dichos objetos para diferentes perfiles de intensidad. Los objetivos son los siguientes: <ol style="list-style-type: none">1. Estudio y análisis de soluciones con simetría axial.2. Análisis de geodésicas nulas en dichas métricas.3. Simulación de las trayectorias descritas por la luz en este tipo de métricas usando la técnica del “ray-tracing”.4. Simulación de la apariencia de objetos con esa simetría considerando diferentes perfiles de intensidad e inclinación con respecto al observador. Por la temática del trabajo se requieren amplios conocimientos de Relatividad General y el manejo avanzado de softwares tales como Mathematica, Matlab ó Python.	

MÁSTER EN FÍSICA

PROPUESTA DE TEMA DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM N° 9

MENCIÓN:	Física Matemática
TÍTULO:	Problemas de frontera en gravedad dilatónica
Tutor/es: (Departamento y grupo de investigación)	Fernando Ruiz Ruiz (U. Complutense de Madrid), José Manuel Izquierdo Rodríguez Dpto. Física Teórica (UCM), Dpto. Física Teórica, Atómica y Óptica (UVa) GIR Física Matemática – MathPhys-UVa, Grupo de Física Teórica UCM e-mail de contacto: josemanuel.izquierdo@uva.es , ferruiz@fis.ucm.es
Resumen y objetivos del TFM:	
<p>El objetivo del trabajo es estudiar la caracterización de las simetrías, su álgebra y sus cargas asociadas en espacios asintóticamente anti-de Sitter con acoplamiento gravedad-dilatón. Ello lleva consigo caracterizar de forma precisa los términos de superficie que son necesarios añadir a la acción de Hilbert-Einstein para tener un principio variacional bien definido, resolver las ecuaciones de campo en la proximidad de la frontera, determinar y caracterizar las simetrías de volumen y de frontera, y calcular las cargas centrales de sus álgebras. Se pretende en la medida de lo posible explorar los formalismos lagrangiano y hamiltoniano.</p>	
Bibliografía	
<p>S. de Haro, K. Skenderis. S. G. Solodukhin, Commun. Math. Phys. 217 (2001) 595-622</p> <p>S. Fischetti, W. Kelly, D. Marolf, Conserved Charges in Asymptotically (Locally) AdS Spacetimes, en A. Ashtekar, V. Petkov, Handbook of Spacetime Springer (2014)</p> <p>G. Barnich, C. Troessaert, Phys. Rev. Lett. 105 (2010), 111103</p>	