



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Efecto Zenón en un ordenador cuántico
<b>Title:</b>	Zeno effect in a quantum computer
<b>Tutor/es:</b>	Ángel Rivas
<b>E-mail tutor/es:</b>	anrivas@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

El célebre "efecto Zenón" en mecánica cuántica suele enunciarse afirmando que un sistema cuántico no puede evolucionar en el tiempo si es continuamente observado. Aparte de su interés fundamental, se ha empleado para estabilizar sistemas cuánticos en un determinado estado. Toma su nombre del filósofo griego Zenón de Elea (c. 490-430 a.C.) quien planteó varias paradojas en relación al movimiento. En una de ellas, Zenón afirmaba que si se observaba por un instante de tiempo una flecha en vuelo, la flecha se vería "quieta", por tanto en una observación continua la flecha no podría moverse.

En no pocas ocasiones, el efecto Zenón cuántico se explica con el manido argumento del "colapso" de la función de onda, de forma que, al medir, el estado de un sistema cuántico "colapsa" a un autoestado del observable medido. Por tanto, si se mide repetidamente el mismo observable la evolución del sistema termina parándose, quedando éste "congelado" en dicho autoestado a medida que la frecuencia de las medidas aumenta.

Sin embargo, esta explicación no es correcta, cuando menos es incompleta. Dejando de lado la problemática del carente significado físico de la idea del colapso de la función de onda, la realidad es que para inducir el efecto Zenón cuántico no hace falta siquiera medir. El efecto Zenón se produce cuando un sistema cuántico experimenta un proceso de decoherencia, sea causado por una medida o no.

El objetivo de este proyecto es comprender bien el origen del efecto Zenón y observarlo mediante un ordenador cuántico accesible de forma remota.

## **Metodología:**

El/la estudiante se familiarizará primero con el problema consultando las fuentes bibliográficas y aclarando con el tutor las dudas que puedan surgir.

Más tarde, estudiará cómo reproducir este efecto modelándolo con un circuito cuántico, simulará varias configuraciones, una incluyendo mediciones y otra sin medir.

Finalmente se prevé que pueda ejecutar el circuito en un ordenador cuántico accesible en red para confirmar las predicciones teóricas.

Es conveniente que el/la estudiante haya cursado la asignatura de Mecánica Cuántica. Conocimientos de programación cuántica con herramientas tales como Qiskit o Pennylane también serían de utilidad.

## **Bibliografía:**

P. Facchi y S. Pascazio, "Quantum Zeno dynamics: mathematical and physical aspects", J. Phys. A: Math. Theo. 41, 493001 (2008).

H.-P. Breuer y F. Petruccione, "The theory of open quantum systems" (Oxford University Press, Oxford, 2002).

A. Alessandrini, C. Ciaramelletti y S. Paganelli, "Observation of the quantum Zeno effect on a NISQ device", Phys. Scr. 99, 095128 (2024).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Paradoja EPR y quantum steering en un ordenador cuántico
<b>Title:</b>	EPR paradox and quantum steering in a quantum computer
<b>Tutor/es:</b>	Ángel Rivas
<b>E-mail tutor/es:</b>	anrivas@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Cuando dos sistemas cuánticos se encuentran en un estado entrelazado, suele decirse que las acciones que se ejecutan sobre uno de ellos afectan de manera instantánea al otro. Esto queda ilustrado en la famosa paradoja de EPR (por Einstein, Podolsky y Rosen), donde el estado de una de las partículas es distinto dependiendo del observable que se decida medir sobre la otra.

Sin embargo, esta dependencia no es equivalente a una relación causal, es decir, no debe entenderse que la medida de un observable sobre la primera partícula "cause" que la segunda cambie instantáneamente de estado ("colapse"). No, se trata tan sólo de un condicionamiento estadístico.

El objetivo de este trabajo es entender bien este fenómeno y observarlo mediante un ordenador cuántico accesible de forma remota. En particular, se quiere observar el efecto cuando la medida sobre el primer sistema es posterior en el tiempo a la medida sobre el segundo, de forma que cualquier interpretación causal quede descartada.

### **Metodología:**

El/la estudiante se familiarizará primero con el problema consultando las fuentes bibliográficas y aclarando con el tutor las dudas que puedan surgir.

Más tarde, estudiará cómo reproducir este efecto modelándolo con un circuito cuántico, simulará varias configuraciones, alternando el orden causal de las medidas sobre cada qubit.

Finalmente, se prevé que pueda ejecutar el circuito en un ordenador cuántico accesible en red para confirmar las predicciones teóricas.

Es recomendable que el/la estudiante haya cursado la asignatura de Mecánica Cuántica. Conocimientos de programación cuántica con herramientas tales como Qiskit o Pennylane también serían convenientes.

### **Bibliografía:**

A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", Phys. Rev. 47, 777 (1935).

D. Bohm, "Quantum theory", (Prentice-Hall, New Jersey, 1951).

M. A. Nielsen y I. L. Chuang, "Quantum Computation and Quantum Information", (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Interés cosmológico de las lentes gravitacionales y la importancia de su modelaje
<b>Title:</b>	Cosmological Relevance of Gravitational Lensing and the Importance of Its Modeling
<b>Tutor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos
<b>E-mail tutor/es:</b>	cembra@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

El objetivo principal de este trabajo consiste en profundizar en el estudio de las lentes gravitacionales y su relevancia en cosmología, recalcando cómo permiten determinar parámetros fundamentales como la constante de Hubble y revelar la distribución de materia, incluidas sus componentes oscuras, a distintas escalas en el universo.

En este sentido, se revisarán los fundamentos teóricos que explican la deflexión de la luz en relatividad general y las manifestaciones observacionales que van desde microlentes estelares hasta arcos y anillos de Einstein en cúmulos galácticos. Además, se analizará la importancia de emplear tiempos de retraso en sistemas de “strong lensing” para contribuir a la resolución de la conocida “tensión de  $H_0$ ”.

Por último, se pretende mostrar cómo se pueden obtener los parámetros físicos que describen una lente gravitacional mediante la simulación y el modelaje de un sistema de lentes con la herramienta GIGA-Lens, evaluando la precisión de la reconstrucción de la masa y de las propiedades geométricas del fenómeno, con el fin de resaltar el impacto cosmológico que tiene el estudio de las lentes gravitacionales.

## Metodología:

Se emplearán directamente conocimientos relacionados con Cosmología y Relatividad General. Las asignaturas de interés serán “Cosmología” y “Relatividad General y Gravitación”. Asimismo, se recomienda haber cursado o tener nociones de “Astrofísica” y “Astrofísica Estelar”. Serán útiles conocimientos en métodos estocásticos y estadística bayesiana para el modelaje.

En particular, el estudiante desarrollará un trabajo que se dividirá en una parte teórica sobre lentes gravitacionales y su interés, y otra parte en la que realizará un modelaje. Para ello, se establecerán y profundizarán los conceptos básicos, empleando simultáneamente posiciones y momentos en el estudio de la deflexión de la luz. Con tal objetivo, el alumno leerá una serie de referencias cuyos resultados deberá analizar e interpretar, aplicando estas ideas a la herramienta GIGA-Lens para la reconstrucción de un sistema.

## Bibliografía:

[1] Narayan, R., & Bartelmann, M. (1996). *Lectures on Gravitational Lensing*. arXiv: astro-ph/9606001

[2] Gu, A. et al. (2022). “GIGA-Lens: Fast Bayesian Inference for Strong Gravitational Lens Modeling”. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6de4>

[3] Kochanek, C. S. (1991). “The Implications of Lenses for Galaxy Structure”. <https://doi.org/10.1086/170057>

[4] Suyu, S. H. et al. (2024). “Time-delay lensing and the Hubble constant”. *Space Science Review*, 220, 13. <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01079-w>



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Antes del Big Bang: de la inflación al universo caliente
<b>Title:</b>	Before the Bang: From Inflation to a Hot Universe
<b>Tutor/es:</b>	Javier Rubio
<b>E-mail tutor/es:</b>	javier.rubio@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	2
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Las anisotropías de temperatura observadas en el Fondo Cósmico de Microondas (CMB) constituyen una instantánea de las perturbaciones primordiales de densidad que, con el tiempo, dieron lugar a la formación de estructuras cósmicas como galaxias y cúmulos. No obstante, persisten preguntas fundamentales: ¿cuál es el origen último de estas perturbaciones? ¿De dónde proviene la materia que conforma el Universo observable?

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo analizar las limitaciones del modelo estándar del Big Bang para responder a estas cuestiones y explorar cómo el paradigma inflacionario ofrece un marco teórico capaz de abordarlas con éxito. En particular, se propone que el estudiante desarrolle uno o varios de los siguientes objetivos:

- ) Extender el formalismo de cuantización canónica de campos, habitualmente formulado en espacio-tiempo de Minkowski, a escenarios cosmológicos extremos, donde conceptos como "vacío" o "partícula" pierden su significado habitual.
- ) Demostrar que el tratamiento cuántico de las fluctuaciones del vacío en un espacio-tiempo tipo de Sitter predice un espectro de perturbaciones de densidad en notable concordancia con las observaciones actuales, así como la existencia de un fondo cósmico de ondas gravitacionales aún no detectado.
- ) Estudiar la transición de un Universo post-inflacionario, frío y vacío, al estado caliente y altamente entrópico que caracteriza al Universo observable, mediante el análisis de mecanismos no perturbativos de producción de partículas, tales como la resonancia paramétrica o las inestabilidades espinodales.

**Metodología:**

Reuniones periódicas con el supervisor y estudio guiado de capítulos de libros, apuntes y artículos científicos de carácter introductorio propuestos en la bibliografía, derivando algunas de las expresiones más relevantes en el campo. En algunas tareas concretas, el trabajo podría incluir la utilización de programas de cálculo numérico y/o simbólico relacionados con los objetivos propuestos, pero siempre a nivel utilizador.

Se recomienda haber cursado o estar matriculado en las asignaturas optativas "Mecánica Cuántica", "Relatividad General y Gravitación" y "Campos Cuánticos". Los contenidos de la asignatura "Cosmología" podrían resultar útiles, pero no son estrictamente necesarios.

**Bibliografía:**

- [1] Introduction to Quantum Effects in Gravity, Viatcheslav Mukhanov y Sergei Winitzki, Cambridge University Press, 2007. Also online
- [2] Notas del curso "QFT in the Early Universe"  
<https://javierrubioblog.com/teaching/qftearlyuniverse/>
- [3] Inflationary Perturbations: the Cosmological Schwinger Effect, Jerome Martin, arXiv:0704.3540.
- [4] The Quantum Mechanics of the Scalar Field in the New Inflationary Universe, Alan. H. Guth, So-Young Pi, *Phys.Rev.D* 32 (1985) 1899-1920
- [5] Towards the theory of reheating after Inflation, Lev Kofman, Andrei Linde, Alexei Starobinsky, arXiv:hep-ph/9704452.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Introducción a la Información Cuántica y Computación Cuántica
<b>Title:</b>	Introduction to Quantum Information and Quantum Computation
<b>Tutor/es:</b>	Miguel Angel Martin-Delgado
<b>E-mail tutor/es:</b>	mardel@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Realizar una introducción teórica a la información y computación cuánticas, explicando sus principios fundamentales y su relación con la computación clásica.

Poner en contexto el resultado de supremacía cuántica (de forma teórica) y realizar una simulación similar a menor escala.

**Metodología:**

Reuniones periódicas con el alumno y estudio guiado de la bibliografía básica y fuentes en la red. Asistencia a seminarios organizados por el Grupo de Información y Computación Cuántica de la Facultad de CC. Físicas.

**Bibliografía:**

- 1) "Information and Computation: Classical and Quantum aspects" Galindo, A., Martin-Delgado, M.A., Rev. Mod. Phys. 74, 347 (2002)
- 2) "Quantum Computation and Quantum Information" Nielsen, M.A., I.L. Chuang, Cambridge Univ. Press 2000
- 3) "Elementary gates for quantum computation" Barenco, A., Bennet, C.H., Cleve, R. et al, Phys. Rev. A 52, 3457-3467
- 4) "Characterizing quantum supremacy in near-term devices" Boixo, S., Isakov, S.V., Smelyanskiy, V.N. et al., Nature Phys. 14, 595-600, 2018



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Lentes gravitacionales y halos galácticos
<b>Title:</b>	Gravitational lenses and galactic haloes
<b>Tutor/es:</b>	Felipe J. Llanes Estrada
<b>E-mail tutor/es:</b>	fllanes@fis.ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Comprender la desviación gravitacional de la luz en Relatividad General y su uso para revelar campos gravitatorios cuya fuente no se conozca, presumiblemente, halos de materia oscura a escala galáctica.

Ser capaz de extraer características básicas de esos halos.

Demostrar nociones de cálculo numérico, dominio de las asignaturas relevantes del grado y las competencias transversales propias del trabajo de fin de grado.

## **Metodología:**

El alumno(a) estudiará la desviación de la luz en un campo esférico, y a continuación el trabajo de Turyshev y Toth sobre la deflexión en un campo sin esa simetría.

Estudiará el trazado de rayos y la dependencia con la forma del campo gravitatorio de las imágenes obtenidas de las fuentes en el fondo; con el perfil de densidad de la lente, etc.

Aplicará la teoría conocida al caso concreto de una galaxia típica como Andrómeda o la Vía Láctea.

Estudiará la correlación entre las curvas de velocidad galácticas y la intensidad de la desviación gravitacional de la luz y realizará los cálculos numéricos necesarios para presentar gráficamente todos estos fenómenos.

La memoria del trabajo estará escrita en registro académico libre de faltas gramaticales o de ortografía.

Asignaturas (orientativamente) más relevantes: Óptica, Mecánica clásica, Relatividad General, Cosmología, Física Computacional.

## **Bibliografía:**

1) J. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. Cambridge University Press, 2021.

2) Cosmology, Steven Weinberg, Oxford University Press, 2008.

3) M. Meneghetti, Introduction to Gravitational Lensing with Python Examples. Lecture Notes in Physics. Springer International Publishing, 2021.

4) S. Turyshev y V. Toth, Phys. Rev. D 105 024022 (2022).

5) A. Bariego-Quintana et. al. Phys. Rev. D 107 083524 (2023).

6) The Elements of Style, de William Strunk JR. y E.B. White, Guía para escribir de manera clara y concisa un trabajo universitario.

7) Trabajo de Fin de Grado de D. Víctor García Cervantes, promoción 2023-24 (proporcionado por el tutor).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Estrellas de neutrones y QCD a gran densidad en un futuro ordenador cuántico
<b>Title:</b>	Neutron stars and high-density QCD on a future quantum computer
<b>Tutor/es:</b>	Juan J. Gálvez Viruet y Felipe J. Llanes Estrada
<b>E-mail tutor/es:</b>	juagalve@ucm.es, fllanes@fis.ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	2
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

El alumno o alumna comprenderá el concepto de ecuación de estado en un sistema termodinámico en equilibrio, al menos local, el de potencial químico, y entenderá cómo se aplica en el contexto de las estrellas de neutrones, habiendo estudiado la ecuación de Tolman-Oppenheimer-Volkoff.

Demostrará igualmente entender los rudimentos de programación necesarios para simular un sistema cuántico en un ordenador cuántico.

Estudiará los contenidos mínimos convenientes para entender la formulación de la Cromodinámica en cuantización canónica y verá de desplegarla en una malla con objeto de poder extraer eventualmente la energía de un pequeño volumen de materia de neutrones/quarks en equilibrio.

Demostrará pues de manera integrada sus competencias analíticas y numéricas en relación a sus estudios del grado en física, siendo asignaturas recomendadas para cursar este trabajo Mecánica Cuántica, Partículas Elementales, Física Nuclear, Materia Condensada, Campos Cuánticos, Física Computacional, Termodinámica, Astrofísica y Relatividad General.

## Metodología:

El alumno/a estudiará la bibliografía recomendada y mantendrá reuniones de seguimiento regulares. Si no lo cursó anteriormente, realizará un laboratorio computacional de 6 horas que hemos desarrollado en un proyecto de innovación y aumentará su conocimiento de la computación cuántica, adquirido en él, estudiando la fórmula de Trotter y el manejo de Hamiltonianos y ligaduras.

Se le proporcionará un algoritmo para implementar sistemas cuantizados canónicamente en un ordenador cuántico, que revisará y utilizará para explorar la formulación de la Cromodinámica.

Igualmente se le proporcionará un programa tradicional para resolver la ecuación TOV en relatividad general, que le servirá para poder extraer observables en estrellas de neutrones.

Se anima a la colaboración en equipo, pero cada memoria reflejará los aspectos del estudio propios (en un tfg con mayor concentración en transformaciones canónicas y condensados de fermiones, en el otro condiciones de contorno y ligaduras, por ejemplo), será individual y escrita en registro académico libre de faltas gramaticales o de ortografía.

## Bibliografía:

- 1) F. Halzen y A. Martin, "Quarks and leptons: introductory course in modern particle physics", Wiley 1991 (para comprender aspectos básicos de la física de partículas).
- 2) E. Johnston, N. Harrigan y M. Gimeno-Segovia, "Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples", O'Reilly Media 2019.
- 3) Felipe J. Llanes-Estrada y Eva Lope-Oter, "Hadron matter in neutron stars in view of gravitational wave observations", Prog.Part.Nucl.Phys. 109 (2019) 103715.
- 4) Juan J. Gálvez Viruet y Felipe J. Llanes Estrada, "Dynamical implementation of canonical second quantization on a quantum computer", Phys.Rev.D 110 (2024) 11, 116018
- 5) The Elements of Style, de William Strunk JR. y E.B. White, (guía para escribir de manera clara y concisa un trabajo universitario).
- 6) J. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. Cambridge University Press, 2021.
- 7) Trabajos de fin de grado anteriores como ejemplo (curso 2024-25) y en general material UCM proporcionado por los tutores.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Fenómenos de producción gravitatoria de partículas
<b>Title:</b>	Particle production phenomena in non-trivial spacetimes
<b>Tutor/es:</b>	Luis J. Garay, Álvaro Álvarez Domínguez
<b>E-mail tutor/es:</b>	luisj.garay@ucm.es, alvalv04@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Se estudiarán fenómenos de producción de partículas en el marco de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos. Para ello, se cuantizarán campos escalares mediante el formalismo canónico en fondos clásicos como agujeros negros o campos electromagnéticos intensos.

Uno de los enfoques principales será el uso de detectores de Unruh-DeWitt que interactúan con el campo cuántico, lo que permite una interpretación operacional de los procesos de detección. Los resultados obtenidos con este enfoque se compararán con los del formalismo tradicional basado en transformaciones de Bogoliubov.

**Metodología:**

Usando las técnicas propias de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos, se procederá a la realización de cálculos (principalmente analíticos) que respondan a las cuestiones planteadas. Además, se hará uso de la bibliografía recomendada, además de analizar el estatus actual a través de algunos artículos científicos sobre el tema.

Se recomienda haber cursado o estar cursando "Electrodinámica clásica", "Campos Cuánticos", "Relatividad General y Gravitación" y "Mecánica Cuántica".

**Bibliografía:**

- D. Hümmel, E. Martín-Martínez, A. Kempf, Renormalized Unruh-DeWitt particle detector models for boson and fermion fields, Phys. Rev. D 93, 024019 (2016).
- A. Fabbri, J. Navarro-Salas, Modeling black hole evaporation, Imperial College Press, 2005.
- N.D. Birrell, P.C.W. Davies, Quantum fields in curved space, Cambridge University Press, 1982.
- V. Mukhanov, S. Winiktzki, Introduction to Quantum Effects in Gravity, Cambridge University Press, 2007.
- R. Wald, Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics, University of Chicago Press, 1994.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Campos cuánticos en espaciotiempos curvos
<b>Title:</b>	Quantum fields in curved spacetimes
<b>Tutor/es:</b>	Luis J. Garay
<b>E-mail tutor/es:</b>	luisj.garay@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Se estudiarán algunos aspectos de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos mediante el análisis de modelos sencillos. Entre las posibles tareas a realizar, se hallan el estudio de la producción gravitacional de partículas debida a la expansión del espaciotiempo o la radiación de Hawking en los procesos de colapso gravitatorio completo, así como su realización en modelos análogos de gravedad. Adicionalmente, se analizarán las ambigüedades inherentes al proceso de cuantización de campos relativistas en estos procesos.

**Metodología:**

Estudio de la bibliografía recomendada, análisis del estatus actual a través de algunos artículos científicos sobre el tema y cálculos propios de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos.

Se recomienda haber cursado o estar cursando "Electrodinámica clásica", "Campos Cuánticos", "Relatividad General y Gravitación" y "Mecánica Cuántica".

**Bibliografía:**

- A. Fabbri, J. Navarro-Salas, Modeling black hole evaporation, Imperial College Press, 2005.
- N.D. Birrell, P.C.W. Davies, Quantum fields in curved space, Cambridge University Press, 1982.
- V. Mukhanov, S. Winiktzki, Introduction to Quantum Effects in Gravity, Cambridge University Press, 2007.
- R. Wald, Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics, University of Chicago Press, 1994.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Campos cuánticos en agujeros negros
<b>Title:</b>	Quantum fields in black holes
<b>Tutor/es:</b>	Luis J. Garay
<b>E-mail tutor/es:</b>	luisj.garay@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

- En primer lugar, se entenderán las herramientas propias de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos, analizando el proceso de cuantización canónica de campos de materia en escenarios no triviales.
- Se estudiarán los espaciotiempos de agujeros negros (como Schwarzschild o Reissner-Nordström) en el contexto de la relatividad general.
- Se entenderán las ambigüedades en la elección del vacío cuántico en estos escenarios.
- Se analizarán fenómenos cuánticos que ocurren en el seno de estos espaciotiempos donde la intensidad gravitatoria es enorme. En particular, uno de los aspectos en los que nos centraremos será en efectos de producción de partículas tales como el efecto Hawking.

### **Metodología:**

Usando las técnicas propias de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos, se procederá a la realización de cálculos (principalmente analíticos) que respondan a las cuestiones planteadas. Además, se hará uso de la bibliografía recomendada, además de analizar el estatus actual a través de algunos artículos científicos sobre el tema.

Se recomienda haber cursado o estar cursando "Electrodinámica clásica", "Campos Cuánticos", "Relatividad General y Gravitación" y "Mecánica Cuántica".

### **Bibliografía:**

- A. Fabbri, J. Navarro-Salas, Modeling black hole evaporation, Imperial College Press, 2005.
- N.D. Birrell, P.C.W. Davies, Quantum fields in curved space, Cambridge University Press, 1982.
- V. Mukhanov, S. Winiktzki, Introduction to Quantum Effects in Gravity, Cambridge University Press, 2007.
- R. Wald, Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics, University of Chicago Press, 1994.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Teoría de la Información Cuántica y Computación Cuántica
<b>Title:</b>	Quantum Information and Quantum Computation
<b>Tutor/es:</b>	Miguel Angel Martin-Delgado
<b>E-mail tutor/es:</b>	mardel@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Hacer una introducción a la teoría de la información cuántica mostrando cuáles son los principios y relación con la mecánica cuántica y con la teoría de la información clásica. Estudiar protocolos y algoritmos relevantes como: teleportación cuántica, codificación densa, algoritmos de Grover y Shor. Perspectivas actuales para su desarrollo.

**Metodología:**

Reuniones periódicas con el alumno y estudio guiado de la bibliografía básica y fuentes en la red. Asistencia a seminarios organizados por el Grupo de Información y Computación Cuántica de la Facultad de CC. Físicas.

**Bibliografía:**

- 1) Physics World. Ejemplar de la revista de Marzo, 1998
- 2) "Information and Computation: Classical and Quantum aspects" Galindo, A., Martin-Delgado, M.A., Rev.Mod.Phys.74, 347 (2002)
- 3) "Quantum Computation and Quantum Information" Nielsen, M.A., I.L. Chuang, Cambridge Univ. Press 2000.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Modelo de Ising en dos dimensiones: una introducción
<b>Title:</b>	An introduction to the square-lattice Ising model
<b>Tutor/es:</b>	María Jesús Rodríguez Plaza
<b>E-mail tutor/es:</b>	mjrplaza@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Este trabajo está destinado a que el alumno estudie la matriz de transferencia del modelo de Ising en el plano y que calcule, guiado por la bibliografía, la energía libre del modelo.

**Metodología:**

Lectura de algunos capítulo de los libros mencionados en la bibliografía.

Se recomiendan conocimientos de variable compleja.

**Bibliografía:**

R.J. Baxter, *Exactly Solved Models in Statistical Mechanics*, Academic Press, 1982.

y referencias citadas en este libro.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	El efecto Sommerfeld para la detección de materia oscura
<b>Title:</b>	Sommerfeld effect in dark matter detection
<b>Tutor/es:</b>	Clara Peset Martín
<b>E-mail tutor/es:</b>	cpeset@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

- Estudiar la detección indirecta por aniquilación de materia oscura.
- Entender el efecto Sommerfeld en sistemas cuánticos sencillos como un pozo de potencial o el potencial de Coulomb/Yukawa
- Obtener el potencial asociado a los casos más sencillos de WIMP (partículas masivas que interactúan débilmente) y obtener su factor de Sommerfeld.
- Analizar el impacto del efecto Sommerfeld en la detección indirecta de materia oscura.

## **Metodología:**

El proyecto combina el estudio de la materia oscura como partículas fundamentales con efectos asociados a su carácter no-relativista, es decir con paradigmas de física cuántica. Mediante un uso combinado del tratamiento de los efectos relativistas y la ecuación de Schrödinger se obtiene un framework muy útil en la física de la materia oscura. En particular se estudiarán las teorías efectivas no relativistas como base para llevar a cabo estos cálculos.

## **Bibliografía:**

- A. Sommerfeld. *Annalen der physik*, 403, 257. (1931).
- N. Arkani-Hamed, D. P. Finkbeiner, T. Slatyer, and N. Weiner. *A theory of dark matter*. (2009).
- M. Beneke, C. Hasner, K. Urban and M. Vollmann,  
"Precise yield of high-energy photons from Higgsino dark matter annihilation," *JHEP* 03 (2020), 030
- M. Beneke, C. Hellmann and P. Ruiz-Femenia, "Non-relativistic pair annihilation of nearly mass degenerate neutralinos and charginos I. General framework and S-wave annihilation," *JHEP* 03 (2013), 148



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Breve introducción a la función elípticas de Weierstrass
<b>Title:</b>	Weierstrass elliptic functions: a brief introduction
<b>Tutor/es:</b>	María Jesús Rodríguez Plaza
<b>E-mail tutor/es:</b>	mjrplaza@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Una función elíptica es una función del plano complejo con dos períodos independientes. Se propone este trabajo para que el alumno estudie que dichas funciones no pueden ser analíticas, el número de polos y ceros que pueden tener en el dominio fundamental y otras propiedades. Como ejemplo se introducirá la función P de Weierstrass.

**Metodología:**

Lectura de algunos capítulo de los libros mencionados en la bibliografía.

Se recomiendan conocimientos básicos de variable compleja.

**Bibliografía:**

E.T. Whittaker and G.N. Watson, *A course of Modern Analysis*, Cambridge University Press, 1962.

Cualquier **buen** libro de Variable Compleja tiene una introducción a las funciones elípticas.