



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	No-localidad sin causalidad a distancia: Un experimento EPR real con inversión temporal de medidas
<b>Title:</b>	Non-locality without remote causality: A real EPR experiment with temporal inversion of measurements
<b>Tutor/es:</b>	Ignacio González, Ángel Rivas
<b>E-mail tutor/es:</b>	ignago10@ucm.es, 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 el primer sistema "cause" que el segundo cambie instantáneamente de estado ("colapse"). No, se trata tan sólo de una correlación estadística.

El objetivo de este trabajo es entender bien este fenómeno y observarlo mediante un ordenador cuántico real accesible de forma remota. En particular, se busca ejecutar el experimento de forma que la medida del primer sistema sea cronológicamente posterior a la del segundo, demostrando que la correlación persiste incluso cuando una relación causa-efecto es físicamente imposible.

### Metodología:

El/la estudiante se familiarizará primero con el problema. Más tarde, estudiará cómo reproducir este efecto modelándolo con un circuito cuántico, 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.

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 2026-27



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Precisión cuántica: Superando el límite clásico de error con un ordenador cuántico
<b>Title:</b>	Quantum precision: improving the classical error limit with a quantum computer
<b>Tutor/es:</b>	Ignacio González, Ángel Rivas
<b>E-mail tutor/es:</b>	ignago10@ucm.es, anrivas@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Como es bien conocido, al repetir  $n$  veces la medida de una cantidad física, su error disminuye como  $1/n^{1/2}$ . Esta ley de escala, que es consecuencia de un argumento estadístico clásico, puede, sin embargo, mejorarse mediante el uso de sistemas físicos que presentan propiedades genuinamente cuánticas, como el entrelazamiento.

Este fenómeno es la base de algunas de las aplicaciones más prometedoras de la "metrología cuántica", el área que busca explotar las propiedades cuánticas de la materia y la radiación para realizar medidas extremadamente precisas; medidas que permitan, por ejemplo, poner a prueba predicciones de las teorías físicas más sofisticadas.

El objetivo del trabajo es entender cómo se puede alcanzar una ley de escala  $1/n$  en el error cometido al determinar una propiedad física por métodos cuánticos, así como observar dicha ley utilizando un ordenador cuántico real.

### Metodología:

El/la estudiante se familiarizará primero con el problema. Más tarde, estudiará cómo reproducir este efecto modelándolo con un circuito cuántico. Finalmente, se prevé que pueda ejecutar el circuito en un ordenador cuántico accesible en red.

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:

V. Giovannetti, S. Lloyd y L. Maccone, "Quantum Metrology", Phys. Rev. Lett. 96, 010401 (2006).

S. F. Huelga, C. Macchiavello, T. Pellizzari, A. K. Ekert, M. B. Plenio y J. I. Cirac, "Improvement of Frequency Standards with Quantum Entanglement", Phys. Rev. Lett. 79, 3865 (1997).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Fundamentos de la Gravedad Cuántica
<b>Title:</b>	Foundations of Quantum Gravity
<b>Tutor/es:</b>	Daniele Oriti
<b>E-mail tutor/es:</b>	doriti@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	5
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Los estudiantes tendrán una introducción a las cuestiones generales a abordar en la construcción de una teoría de la gravedad cuántica y del espacio-tiempo cuántico, a nivel matemático, físico y conceptual. Obtendrán una imagen básica de los distintos enfoques de estos temas, y una comprensión más detallada de algunos de ellos, trabajando en uno específico en un contexto simple (elegido según los antecedentes y preferencias de los estudiantes). Algunos de los temas que se cubrirán se superpondrán con cuestiones relacionadas con los fundamentos de la mecánica cuántica y la cosmología fundamental. Posibles temas a elegir por los estudiantes:

- Ejemplos de geometría cuántica
- Modelado del espacio-tiempo como un sistema cuántico de muchos cuerpos
- Extracción de dinámicas cosmológicas de modelos de gravedad cuántica
- Problemas conceptuales en gravedad cuántica

### Metodología:

Estudio de los temas a través de la bibliografía recomendada, algún material adicional introductorio o de repaso y algunos artículos científicos especializados. Se recomienda haber estudiado o estar estudiando "Mecánica Cuántica", y "Mecánica Teórica", y, posiblemente, "Relatividad General y Gravitación" y "Teoría de Campos Cuánticos".

### Bibliografía:

R. Wald, General Relativity, University of Chicago Press, 1984.

A. Peres, Quantum Theory: concepts and methods, Kluwer, 1997

J. Butterfield, C. Isham, arXiv: gr-qc/9903072

Approaches to Quantum Gravity, edited by Daniele Oriti, Cambridge University Press, 2009



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Integrabilidad, caos y entrelazamiento en sistemas cuánticos
<b>Title:</b>	Integrability, chaos and entanglement in quantum systems
<b>Tutor/es:</b>	Federico Finkel Morgenstern, Artemio González López
<b>E-mail tutor/es:</b>	ffinkel@ucm.es, artemio@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	3
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

En este trabajo se abordan distintas cuestiones relacionadas con las nociones de integrabilidad, caos y entrelazamiento en sistemas cuánticos. Se procurará adaptar el trabajo propuesto a la formación y los intereses del alumno. Más concretamente, se pretende que el alumno alcance alguno de los siguientes objetivos:

- Estudiar las propiedades fundamentales de los modelos cuánticos de muchos cuerpos de tipo Calogero–Sutherland, y su relación con cadenas de espines con interacciones de largo alcance.
- Aprender los conceptos básicos de la teoría de matrices aleatorias y su aplicación en la determinación del comportamiento integrable/caótico de los sistemas cuánticos.
- Entender la definición de la entropía de entrelazamiento en un sistema cuántico, y evaluarla en el modelo de Heisenberg de tipo XX o en versiones inhomogéneas de esta cadena.

## Metodología:

Lectura de capítulos de libros y/o artículos científicos introductorios relacionados con los objetivos propuestos (ver Bibliografía). En algunos casos, se pedirá que el alumno realice algún cálculo, comprobación o simulación utilizando el programa de cálculo simbólico Mathematica.

## Bibliografía:

- J.C. Barba, F. Finkel, A. González-López, M.A. Rodríguez, The Berry-Tabor conjecture for spin chains of Haldane-Shastry type, *Europhys. Lett.* 83, 27005 (2008).
- F. Finkel, A. González-López, Global properties of the spectrum of the Haldane-Shastry spin chain, *Phys. Rev. B* 72, 174411 (2005).
- F. Finkel, A. González-López, Inhomogeneous XX spin chains and quasi-exactly solvable models, *J. Stat. Mech.-Theory E.* 2020, 093105 (2020).
- P.J. Forrester, *Log-gases and Random Matrices*, Princeton University Press, 2010.
- J.I. Latorre, A. Riera, A short review on entanglement in quantum spin systems, *J. Phys. A: Math. Theor.* 42, 504002 (2009).
- M.L. Mehta, *Random Matrices*, Elsevier, 2010.
- M.A. Nielsen, I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th anniversary ed., Cambridge University Press, 2010.
- A.P. Polychronakos, The physics and mathematics of Calogero particles, *J. Phys. A* 39, 12793 (2006).
- H.J. Stöckmann, *Quantum Chaos. An Introduction*, Cambridge University Press, 1999.
- B. Sutherland, *Beautiful Models. 70 Years of Exactly Solved Quantum Many-Body Problems*, World Scientific, 2004.
- M. Zapata, F. Finkel, A. González López, Local fermion density in inhomogeneous free-fermion chains: a discrete WKB approach, *SciPost Physics.* 20, 078 (2026).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27



## 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 large-density QCD on a future quantum computer
<b>Tutor/es:</b>	Felipe J. Llanes Estrada
<b>E-mail tutor/es:</b>	fllanes@fis.ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	3
<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 con 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:

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. Estudiará métodos típicos de teorías de muchos cuerpos como el de BCS y la formación de condensados, y la expansión en cúmulos acoplados.

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 otro en condiciones de contorno y ligaduras, en un tercero mayor enfoque en el efecto de lo estudiando sobre la estructura de la estrella, 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.
- 8) Peter Ring, Peter Schüick, The Nuclear Many Body Problem, Springer-Verlag New York-Heidelberg-Berlin, 1980.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Producción de partículas en el espacio de fases
<b>Title:</b>	Particle production in phase space
<b>Tutor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos
<b>E-mail tutor/es:</b>	cembra@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	4
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

La formulación en el espacio de fases ofrece un marco unificado para estudiar la dinámica de campos cuánticos mediante herramientas de geometría simpléctica y distribuciones de cuasiprobabilidad. Su importancia radica en la capacidad de describir de forma equivalente procesos clásicos y cuánticos, facilitando el análisis de la estabilidad del vacío y la creación de partículas.

El estudio analiza la creación de partículas en el espacio de fases. Dependiendo del estudiante, se abordarán procesos perturbativos (mediante diagramas de Feynman) o fenómenos no perturbativos como la radiación de Hawking y el efecto Unruh. El primer caso se centrará en el estudio de interacciones fundamentales del Modelo Estándar de partículas, mientras que el segundo investigará cómo la aceleración y la curvatura distorsionan el vacío cuántico, interpretando las transformaciones de Bogoliubov como cambios en la estructura simpléctica del sistema. Además, el estudiante podrá elegir abordar el trabajo con distintas herramientas como la función de Wigner, el espacio de Segal-Bargmann o la cuantización funcional.

### **Metodología:**

Dentro de este proyecto, los alumnos trabajarán en la aplicación directa de los conceptos y técnicas impartidas en varias asignaturas obligatorias y de itinerario de grado asociadas a la física cuántica y la relatividad general. En este sentido, las asignaturas más relacionadas con el trabajo son las asignaturas optativas de cuarto: "Mecánica Teórica" y "Campos Cuánticos", mientras que también son recomendables las asignaturas de "Coherencia Óptica y Láser", "Relatividad General y Gravitación" y "Cosmología". En particular, los estudiantes desarrollarán un trabajo fundamentalmente teórico sobre la formulación simpléctica de la mecánica cuántica.

### **Bibliografía:**

- [1] H. J. Groenewold, "On the Principles of elementary quantum mechanics", *Physica*, 12 (1946)
- [2] J. E. Moyal, "Quantum mechanics as a statistical theory", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949)
- [3] H. Weyl, "Quantenmechanik und Gruppentheorie", *Zeitschrift für Physik*, 46 (1927)
- [4] E. P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium", *Phys. Rev.* 40 (1932)
- [5] Curtright, T. L.; Zachos, C. K. (2012). "Quantum Mechanics in Phase Space". *Asia Pacific Physics*