



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	FÍSICA TEÓRICA	
<b>Título:</b>	FÍSICA ESTADÍSTICA DEL APRENDIZAJE NO SUPERVISADO	
<b>Title:</b>	STATISTICAL PHYSICS OF UNSUPERVISED LEARNING	
<b>Supervisor/es:</b>	AURÉLIEN DECELLE	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	<a href="mailto:adecelle@ucm.es">adecelle@ucm.es</a>	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Entender y analizar el aprendizaje de una red de neuronas generativa parecida a un modelo de Ising en ferromagnetismo. Explorar la dinámica del aprendizaje y/o los estados de la máquina entrenada.

### METODOLOGÍA:

El/la estudiante tendrá que estudiar los principios básicos del aprendizaje automatizado y ser capaz de implementarlos a nivel práctico en una base de datos real. En particular, tendrá que entender los métodos del ascenso del gradiente y de simulación de Monte Carlo, y cómo aplicarlos en la práctica en el contexto del entrenamiento de una Restricted Boltzmann Machine (RBM). El/la estudiante tendrá que escribir un programa en Python para entrenar una RBM, estudiar la dinámica de aprendizaje en equilibrio y fuera del equilibrio, y ser capaz de identificar los estados de equilibrio aprendidos por la máquina. Estos resultados numéricos se analizarán y compararán con resultados analíticos, como el diagrama de fases del modelo, que pueden obtenerse de manera sencilla usando técnicas de física estadística y aproximaciones de campo medio.

### BIBLIOGRAFÍA:

Decelle, A., & Furtlehner, C. (2020). Restricted Boltzmann Machine, recent advances and mean-field theory. *Chinese Physics B*  
*Hinton, G. A Practical Guide to training Restricted Boltzmann Machine*



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo 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>Supervisor/es:</b>	Federico Finkel Morgenstern y Artemio González López	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	<a href="mailto:ffm@ucm.es">ffm@ucm.es</a> , <a href="mailto:artemio@ucm.es">artemio@ucm.es</a>	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

En este tema se abordan distintas cuestiones relacionadas con las nociones de solubilidad, integrabilidad y caos y propiedades de entrelazamiento en sistemas cuánticos. Dada la amplitud del tema, 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 integrables de muchos cuerpos de tipo Calogero–Sutherland, y su relación con cadenas de espines solubles 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 para alguna cadena de espines integrable sencilla (por ejemplo, el modelo de Heisenberg de tipo XX).

### 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:

- M. Baradaran, J.A. Carrasco, F. Finkel, A. González-López: Jastrow-like ground states for quantum many-body potentials with near-neighbors interactions, *Ann. Phys.-New York* 388, 147 (2017).
- J.A. Carrasco, F. Finkel, A. González-López, M.A. Rodríguez, Supersymmetric spin chains with nonmonotonic dispersion relation: Criticality and entanglement entropy, *Phys. Rev. E* 93, 155154 (2016).
- F. Finkel, A. González-López, Global properties of the spectrum of the Haldane-Shastry spin chain, *Phys. Rev. B* 72, 174411 (2005).
- 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).
- B. Sutherland, *Beautiful Models. 70 Years of Exactly Solved Quantum Many-Body Problems*, World Scientific, 2004.
- T. Koprucki, H. Wagner, New exact ground states for one-dimensional quantum many-body systems, *J. Stat. Phys.* 100, 779 (2000).
- 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.
- M. L. Mehta, *Random Matrices*, Elsevier, 2010.
- 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. A. Nielsen, I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10<sup>th</sup> anniversary ed., Cambridge University Press, 2010.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Física Cuántica e Información Cuántica
<b>Title:</b>	Quantum Physics and Quantum Information
<b>Supervisor/es:</b>	Ángel Rivas
<b>E-mail Supervisor/es</b>	<a href="mailto:anrivas@ucm.es">anrivas@ucm.es</a>
<b>Número de plazas:</b>	2
<b>Asignación de TFG</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

- Introducir al alumno en la teoría que describe el comportamiento de la información en los sistemas cuánticos.
- Indagar en las propiedades físicas de la información a escala microscópica, tanto desde el punto de vista fundamental como aplicado en tareas de procesamiento o transmisión.
- Familiarizarse con el formalismo, los conceptos principales y aprender alguna de las técnicas básicas que se emplean para describir los sistemas cuánticos abiertos, es decir aquellos intercambian información con el ambiente.

### METODOLOGÍA:

Es altamente recomendable que el alumno haya cursado la asignatura de "Mecánica Cuántica" (o su equivalente ERASMUS).

Después de acordar con el supervisor la línea a desarrollar, el alumno dedicará tiempo a revisar la literatura a fin de comprender los conceptos implicados. Deberá entender la descripción formal de fenómenos fundamentales de la teoría cuántica como la coherencia y el entrelazamiento. Después de familiarizarse con la teoría, se espera que pueda analizar algún sistema sencillo, o centrarse en alguna cuestión específica. Este trabajo pretende complementar la formación en física cuántica que

se ve en el grado, proporcionando al alumno un acercamiento a la física de la información en sistemas cuánticos controlados.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- M. Nielsen y I. Chuang, "Quantum Information and Quantum Computation", Cambridge University Press 2000.
- D. F. Walls and G. J. Milburn, "Quantum Optics", Springer 2008.
- B. Schumacher and M. Westmoreland, "Quantum Processes Systems, and Information", Cambridge University Press 2010.
- A. Rivas, S. F. Huelga, "Open Quantum Systems. An Introduction", Springer 2012.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Física, Matemáticas y Música	
<b>Title:</b>	Physics, Maths and Music	
<b>Supervisor/es:</b>	Ángel Rivas	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	<a href="mailto:anrivas@ucm.es">anrivas@ucm.es</a>	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

- Entender las bases físicas así como la estructura matemática de la música.
- Aplicar técnicas de física teórica y matemática tales como el análisis funcional, la teoría de grupos, la mecánica cuántica o la teoría de la información en la descripción de fenómenos musicales.
- Comprender la utilidad de estas técnicas en el análisis y procesamiento del sonido.

### METODOLOGÍA:

Es altamente recomendable que el alumno haya cursado las asignaturas de "Mecánica Cuántica" y "Simetrías y Grupos en Física" (o sus equivalentes ERASMUS). Cierta familiaridad con la teoría musical sería igualmente deseable.

Después de acordar con el supervisor la línea a desarrollar, el alumno dedicará tiempo a revisar la literatura a fin de comprender los conceptos implicados en el trabajo. Posteriormente aplicará lo aprendido en algún problema concreto. El trabajo tiene principalmente un carácter formativo, proporcionando al alumno una visión acerca de las conexiones entre la física y las matemáticas y algunas disciplinas artísticas como la música.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- D. Benson, "Music: A Mathematical Offering", Cambridge University Press 2007. (También en <https://homepages.abdn.ac.uk/d.j.benson/pages/html/music.pdf>).
- N. H. Fletcher y T. D Rossing, "The physics of Musical Instruments", Springer 1998.
- F. Aceff-Sánchez et al. "An introduction to Group Theory. Applications to Mathematical Music Theory", BookBoon 2013. (También en <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.359.3934&rep=rep1&type=pdf>)
- M. Mannone and G. Compagno, Characterization of the degree of Musical non-Markovianity, arXiv:1306.0229.
- P. beim Graben and M. Mannone, "Musical pitch quantization as an eigenvalue problem", J. Math. Music 14, 329, 2020.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	BEATRIZ SEOANE BARTOLOMÉ	
<b>Título:</b>	PAISAJE DE ENERGÍA LIBRE EN PROTEÍNAS	
<b>Title:</b>	Energy landscape perspective in proteins	
<b>Supervisor/es:</b>	Beatriz Seoane Bartolomé	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	beseoane@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Entender los principales resultados de la teoría de campo medio de proteínas y su relación con los modelos de vidrios y vidrios de espín en física. Explorar su validez en proteínas intrínsecamente desordenadas.

### METODOLOGÍA:

El/la estudiante tendrá que sintetizar diferentes artículos de investigación sobre el tema, y sacar en claro conceptos estudiados en Física Estadística como el diagrama de fase o la dinámica fuera del equilibrio. Estos resultados se meterán en contexto con lo conocido en física de vidrios. Además, el/la estudiante tendrá que ser capaz, bien de entender y repetir cálculos analíticos en un modelo simplificado de proteínas, o bien de realizar simulaciones de dinámica molecular en modelos realistas de proteínas. En ambos casos, los resultados se usarán para explorar la validez de estas teorías en proteínas intrínsecamente desordenadas.

### BIBLIOGRAFÍA:

Ferreiro, D., Komives, E., & Wolynes, P. (2014). Frustration in biomolecules. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 47(4), 285-363.  
doi:10.1017/S0033583514000092

Onuchic, J. N., Luthey-Schulten, Z., & Wolynes, P. G. (1997). Theory of protein folding: the energy landscape perspective. *Annual review of physical chemistry*, 48(1), 545-600.





# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Campos gauge en espacio-tiempo no conmutativo	
<b>Title:</b>	Gauge fields on noncommutative spacetime	
<b>Supervisor/es:</b>	Carmelo Pérez Martín	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	carmelop@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Adquisición de los rudimentos necesarios para trabajar en el área de los campos gauge sobre espacio-tiempo no conmutativo.

### METODOLOGÍA:

Estudio y discusión continua con el supervisor

### BIBLIOGRAFÍA:

M.R. Douglas & N. Nekrasov, "Noncommutative field theory" Rev.Mod.Phys. 73(2001) 977.

B. Jurco, L. Moeller, S. Schraml, P. Schupp and J. Wess "Construction of nonabelian gauge theories on noncommutative spaces". Eur. Phys. J.C21 (2001)383.

R.J. Szabo, "Quantum field theory on noncommutative spaces" Phys. Rept. 378(2003)207.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	FISICA TEORICA	
<b>Título:</b>	INTRODUCCION A LA FISICA DE AGUJEROS NEGROS	
<b>Title:</b>	INTRODUCTION TO BLACK HOLE PHYSICS	
<b>Supervisor/es:</b>	DIEGO RUBIERA GARCIA	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	drubiera@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	4	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Alcanzar un conjunto de conocimientos básicos sobre las propiedades geométricas, físicas y observacionales más relevantes de los agujeros negros. Conseguir una primera toma de contacto con los mecanismos de investigación moderna en temáticas actuales de agujeros negros.

### METODOLOGÍA:

En una primera fase se proporcionará material propio recorriendo los aspectos más fundamentales de la física de agujeros negros: soluciones clásicas, horizontes, extensiones máximas, movimiento geodésico, esferas de fotones, soluciones dinámicas, colapso gravitacional, termodinámica, ondas gravitacionales, búsquedas observacionales, singularidades espacio-temporales, gravedad cuántica, etc.

En una segunda fase el alumno escogerá a voluntad un tema de su interés dentro de esta lista (o fuera de ella) para profundizar en él, proporcionándosele al efecto material complementario. Dicha temática especializada constituirá la base del TFG final.

En todo momento el alumno contará con interacción continua con su supervisor.

### BIBLIOGRAFÍA:

M. Hobson: "General Relativity"

R. M. Wald: "General Relativity"

T. Padmanabhan: "Gravitation. Foundations and Frontiers"

P. Joshi: "Gravitational collapse and spacetime singularities"

T. Ortin: "Gravity and Strings " (Capítulos 7 y 8).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Dispersión de ondas electromagnéticas y gravitatorias	
<b>Title:</b>	Scattering of electromagnetic and gravitational waves	
<b>Supervisor/es:</b>	Felipe J. Llanes Estrada	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	fllanes@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Estudiar el índice de refracción de las ondas electromagnéticas y gravitacionales en medios tenues de interés en astrofísica, y el posible retraso en el universo profundo.

### METODOLOGÍA:

El alumno o alumna comprenderá las relaciones de Kramers-Kronig y las de dispersión cuántica (Compton y fotón-fotón); tomando los datos relevantes de la literatura las usará para estimar el leve índice de refracción en cosmología. Con ello y el índice de refracción calculado para las ondas gravitacionales (ref.4) podrá inferir el retraso de las distintas señales. Como aplicación podrá estimar y discutir la posible descorrelación entre el tiempo de llegada de los pulsos de ondas gravitacionales y de radiación de los sucesos de colisión entre dos estrellas de neutrones.

Asignaturas concurrentes recomendadas: Campos Cuánticos, Partículas Elementales, Relatividad General y Gravitación, Cosmología, Electrodinámica Clásica, Interacción Radiación-Materia.

Altamente recomendado haber superado las asignaturas: Física Cuántica II, Mecánica Cuántica, Métodos Matemáticos I (variable compleja), Física Computacional, Estructura de la Materia.

### BIBLIOGRAFÍA:

- 1.-The Elements of Style**, de William Strunk JR. y E.B. White, (cualquier edición es válida). Lectura para escribir de manera clara y concisa un trabajo universitario.
- 2.-Classical Electrodynamics**, J.D. Jackson, John Wiley & Sons Inc; 3rd edición (1998)
- 3.-Scattering theory**, R. Newton, Dover; 2nd Revised edition (2013)
- 4.-Avanzada:** <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.9.2207>, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1983ApJ...266..276L/abstract>  
Tesis doctoral de D. Adiv González Muñoz, colaboración MAGIC (Univ. de Barcelona, 2015).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Información y entropía en chorros de hadrones	
<b>Title:</b>	Information and entropy in hadron jets	
<b>Supervisor/es:</b>	Felipe J. Llanes Estrada	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	fllanes@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El alumno o alumna intentará comprender los principios básicos de la formación de chorros de hadrones y cómo la evolución unitaria del estado inicial, simple, en QCD, se convierte en un medio estadístico aparentemente clásico.

### METODOLOGÍA: S

e estudiarán los principios básicos de las interacciones fuertes y la formación de chorros de hadrones. Se estudiará la entropía clásica de la información contenida en un chorro de hadrones y cómo puede provenir del estado altamente ordenado, pero muy energético, de la colisión inicial de un par electrón-positrón o similar. Se prestará atención también al proceso de fragmentación en hadrones de los partones (quarks y gluones) resultantes.

Asignaturas concurrentes recomendadas: Campos Cuánticos, Partículas Elementales.

Altamente recomendado haber superado las asignaturas: Mecánica Cuántica, Estructura de la Materia.

### BIBLIOGRAFÍA:

- 1.-The Elements of Style**, de William Strunk JR. y E.B. White, (cualquier edición es válida). Lectura para escribir de manera clara y concisa un trabajo universitario.
- 2.- Quarks and Leptons**, F. Halzen y A. D. Martin, John Wiley & Sons 1984
- 3.- Principles of Quantum Computation and Information**, G. Benenti et al., World Scientific (2004)
- 4.- Avanzada**  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.123.142001>  
E. H. Jorstad, "The entropy of jets", Bachelor thesis presented at Lund university.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Réplicas del vacío en QCD y espectroscopía paralela	
<b>Title:</b>	Vacuum replicae of QCD and parallel spectroscopy	
<b>Supervisor/es:</b>	Felipe J. Llanes Estrada	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	fllanes@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Explorar falsos vacíos (mínimos locales de la energía) de QCD en modelos del gauge de Coulomb, y examinar la espectroscopía de los hadrones construidos sobre ellos (en paralelo a los hadrones sobre el vacío absoluto).

Requiere una buena comprensión de la asignatura de Mecánica Cuántica.

### METODOLOGÍA:

El alumno recibirá tablas de datos con funciones que resuelven la ecuación del salto de energía de BCS y le permite calcular la densidad de energía de un estado respecto al vacío trivial de la teoría de campos. Estudiará qué mesones simples se pueden construir sobre ese falso vacío, para lo que recibirá un par de programas que resuelven las ecuaciones de TDA y RPA para los mesones compuestos de un par quark-antiquark, y extraerá conclusiones sobre el espectro excitado de hadrones sobre el falso vacío. Estudiará la probabilidad de transición del estado excitado al fundamental por efecto túnel y dilucidará la analogía con otros sistemas físicos de interés en distintas áreas.

### BIBLIOGRAFÍA:

- 1.- The Elements of Style**, de William Strunk JR. y E.B. White, (cualquier edición es válida). Lectura para escribir de manera clara y concisa un trabajo universitario.
- 2.- QCD vacuum replicas are metastable**, P. Bicudo, J. Ribeiro *Phys.Lett.B* **810** (2020) 135730
- 3.- Coulomb Gauge QCD and the Excited Hadron Spectrum**  
Felipe J. Llanes-Estrada et al. *Fizika B* 20 (2011) 63-74 Contribution to: 3rd Intnl. Conf. on Nuclear and Particle Physics with CEBAF at Jefferson Lab (NAPP 2010)  
e-Print: 1012.5704 [hep-ph]



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	La relatividad general como una teoría gauge	
<b>Title:</b>	General relativity as a gauge theory	
<b>Supervisor/es:</b>	Fernando Ruiz Ruiz	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	ferruiz@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Entender la formulación de la relatividad general como una teoría gauge local.

### METODOLOGÍA:

Se pretende que el alumno sea capaz de forma autónoma de estudiar, entender y reproducir conocimientos propios del tema, entre los que cabe mencionar el vierbein, la conexión de spin, la torsión o el acoplamiento de gravedad a fermiones.

### BIBLIOGRAFÍA:

- M. Göckeler, T. Schücker: Differential geometry, gauge theories, and gravity, Cambridge University Press (Cambridge 1989).
- D.H. Sattinger and O.L. Weaver: Lie Groups and algebras with applications to physics, geometry, and mechanics, Springer-Verlag (Heidelberg 1986).
- R.T. Hammond: Torsion gravity, Rep. Prog. Phys. 65 (2002) 599.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física teórica	
<b>Título:</b>	Estudio de procesos hadrónicos en colisionadores	
<b>Title:</b>	Hadronic processes in colliders	
<b>Supervisor/es:</b>	Ignazio Scimemi	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	ignazios@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

En el trabajo se empezará el estudio de procesos hadrónicos en colisionadores de altas energía. Entre los procesos destacan Drell-Yan, Deep-Inelastic Scattering,  $e+e-$  en hadrones. Para el estudio de estos procesos se considerarán los métodos de teorías efectivas de QCD como soft-collinear-effective-theory. Se podrán considerar procesos que dependan del spin de los hadrones o bien de sus constituyentes, jets, mesones pesados.

### METODOLOGÍA:

Para abordar este estudio es necesario introducir los métodos de teorías efectivas en teoría de campos. Estos métodos necesitan varias herramientas matemáticas como transformadas de Fourier/Laplace, teoría de distribuciones y de física teórica como diagramas de Feynman, teorías de campos perturbativas. A través el estudio de textos originales y algunos ejercicios, se llega a una expresión del formalismo cuyas consecuencias físicas serán estudiadas. Se podrán desarrollar pequeños códigos para ilustrar a través de plots los resultados obtenidos.

### BIBLIOGRAFÍA:

**Introduction to Soft-Collinear Effective Theory**, Thomas Becher, A. Broggio, A. Ferroglia, Lect.Notes Phys. 896 (2015) pp.1-206, e-Print: 1410.1892 [hep-ph]  
**Lecture notes on Soft-Collinear Effective Theory**, I. W. Stewart,

[https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-851-effective-field-theory-spring-2013/lecture-notes/MIT8\\_851S13\\_scetnotes.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-851-effective-field-theory-spring-2013/lecture-notes/MIT8_851S13_scetnotes.pdf)

**Scattering Amplitudes**; H. Elvang, Yu-tin Huang, e-Print: 1308.1697 [hep-th]

**Transverse spin physics** V. Barone, P. Ratcliff, 2003 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 981-238-101-5.

**A short review on recent developments in TMD factorization and implementation**, I. Scimemi, Adv. High Energy Phys. 2019 (2019) 3142510, e-Print:1901.08398 [hep-ph]





# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Paradoja Einstein-Podolsky-Rosen en formalismo simpléctico	
<b>Title:</b>	Einstein-Podolsky-Rosen paradox in symplectic formalism	
<b>Supervisor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	cembra@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

La paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen o paradoja EPR es un experimento mental propuesto por Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en 1935. Es relevante históricamente, puesto que pone de manifiesto un problema aparente de la mecánica cuántica, que ayudó a su comprensión y desarrollo.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la mencionada paradoja EPR bajo un formalismo simpléctico. La descripción más elegante de la física clásica consiste en su formulación simpléctica. Esta formulación, trata en pie de igualdad posiciones y momentos simultáneamente. Sin embargo, desde el artículo de W. Heisenberg en 1927, sobre el denominado principio de incertidumbre, la idea de poder realizar el mismo planteamiento dentro de la física cuántica se puso en cuestión.

La física cuántica sí admite un tratamiento simultáneo de posiciones y momentos. Aunque los primeros trabajos sobre el tema se remontan a los avances de H. Weyl, E. Wigner, H. Groenewold y J. Moyal en los años 30 y 40, la formulación cuántica simpléctica aún no se ha generalizado en los programas docentes ni en los grados ni en los postgrados de física.

En este trabajo se trata de analizar la paradoja EPR dentro de una formulación simpléctica de la mecánica cuántica.

## **METODOLOGÍA:**

Dentro de este proyecto, el alumno trabajará en la aplicación directa de los conceptos y técnicas impartidas en varias asignaturas obligatorias y de itinerario de grado asociadas a la física cuántica. En este sentido, es muy recomendable que el alumno esté matriculado en (o haya superado) las asignaturas optativas de cuarto: “Mecánica Teórica” y “Campos Cuánticos”.

En particular, el estudiante desarrollará un trabajo fundamentalmente teórico sobre la paradoja EPR. Para ello, establecerá y desarrollará los conceptos básicos de dicho experimento mental utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, el alumno leerá una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

[1] H. J. Groenewold, "On the Principles of elementary quantum mechanics", *Physica*, 12 (1946) pp. 405–460. doi:10.1016/S0031-8914(46)80059-4 (<https://doi.org/10.1016%2FS0031-8914%2846%2980059-4>).

[2] J. E. Moyal, "Quantum mechanics as a statistical theory", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949) pp. 99–124. doi:10.1017/S0305004100000487 (<https://doi.org/10.1017%2FS0305004100000487>).

[3] H. Weyl, "Quantenmechanik und Gruppentheorie", *Zeitschrift für Physik*, 46 (1927) pp. 1–46, doi:10.1007/BF02055756 (<https://doi.org/10.1007%2FBF02055756>).

[4] E. P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium", *Phys. Rev.* 40 (June 1932) 749–759. doi:10.1103/PhysRev.40.749 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.40.749>).

[5] Curtright, T. L.; Zachos, C. K. (2012). "Quantum Mechanics in Phase Space". *Asia Pacific Physics Newsletter*. 01: 37–46. arXiv:1104.5269

[6] Cohen, L. (1966). "Generalized Phase-Space Distribution Functions". *Journal of Mathematical Physics*. 7 (5): 781–786. Bibcode:1966JMP.....7..781C (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966JMP.....7..781C>). doi:10.1063/1.1931206 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1931206>).

[7] G. Baker, "Formulation of Quantum Mechanics Based on the Quasi-probability Distribution Induced on Phase Space," *Physical Review*, 109 (1958) pp. 2198–2206. doi:10.1103/PhysRev.109.2198 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.109.2198>)

[8] Fairlie, D. B. (1964). "The formulation of quantum mechanics in terms of phase space functions". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 60 (3): 581–586.

[9] C. L. Mehta "Phase-Space Formulation of the Dynamics of Canonical Variables", *J. Math. Phys.*,5 (1964) pp. 677–686. doi:10.1063/1.1704163  
(<https://doi.org/10.1063%2F1.1704163>)

[10] M. Oliva, D. Kakofengitis, and O. Steuernagel (2018). "Anharmonic quantum mechanical systems do not feature phase space trajectories". *Physica A*. 502: 201–210. arXiv:1611.03303

[11] Marinov, M.S. (1991). "A new type of phase-space path integral". *Physics Letters A*. 153 (1): 5–11. Bibcode:1991PhLA..153....5M  
(<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991PhLA..153....5M>). doi:10.1016/0375-9601(91)90352-9 (<https://doi.org/10.1016%2F0375-9601%2891%2990352-9>).

[12] Curtright, T. L. Time-dependent Wigner Functions  
(<http://www.physics.miami.edu/~curtright/TimeDependentWignerFunctions.html>)



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Entrelazamiento cuántico en espacio de Segal-Bargmann	
<b>Title:</b>	Quantum entanglement in Segal-Bargmann space	
<b>Supervisor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	cembra@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El entrelazamiento cuántico es un término introducido por Erwin Schrödinger en 1935 para describir un fenómeno cuántico que carece de equivalente clásico. Dos o más partículas entrelazadas no pueden definirse como partículas individuales con estados definidos, sino como un sistema con una función de onda única para todo el sistema, estableciéndose correlaciones fundamentales entre las propiedades físicas observables.

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar el mencionado entrelazamiento cuántico en el espacio de Segal-Bargmann. La descripción más elegante de la física clásica consiste en formulaciones que tratan en pie de igualdad posiciones y momentos simultáneamente. Sin embargo, desde el artículo de W. Heisenberg en 1927, sobre el denominado principio de incertidumbre, la idea de poder realizar el mismo planteamiento dentro de la física cuántica se puso en cuestión.

La física cuántica sí admite un tratamiento simultáneo de posiciones y momentos. Aunque los primeros trabajos sobre el tema se remontan a los avances de H. Weyl, E. Wigner, H. Groenewold y J. Moyal en los años 30 y 40, la formulación cuántica en un espacio como el de Segal-Bargmann aún no se ha generalizado en los programas docentes ni en los grados ni en los postgrados de física.

En este trabajo se trata de analizar el entrelazamiento cuántico dentro de una formulación en el espacio de Segal-Bargmann.

## **METODOLOGÍA:**

Dentro de este proyecto, el alumno trabajará en la aplicación directa de los conceptos y técnicas impartidas en varias asignaturas obligatorias y de itinerario de grado asociadas a la física cuántica. En este sentido, es muy recomendable que el alumno esté matriculado en (o haya superado) las asignaturas optativas de cuarto: “Mecánica Teórica” y “Campos Cuánticos”.

En particular, el estudiante desarrollará un trabajo fundamentalmente teórico sobre la formulación en el espacio de Segal-Bargmann. Para ello, establecerá y desarrollará los conceptos básicos de dicho fenómeno intrínsecamente cuántico utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, el alumno leerá una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

- [1] H. J. Groenewold, "On the Principles of elementary quantum mechanics", *Physica*, 12 (1946) pp. 405–460. doi:10.1016/S0031-8914(46)80059-4 (<https://doi.org/10.1016%2FS0031-8914%2846%2980059-4>).
- [2] J. E. Moyal, "Quantum mechanics as a statistical theory", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949) pp. 99–124. doi:10.1017/S0305004100000487 (<https://doi.org/10.1017%2FS0305004100000487>).
- [3] H. Weyl, "Quantenmechanik und Gruppentheorie", *Zeitschrift für Physik*, 46 (1927) pp. 1–46, doi:10.1007/BF02055756 (<https://doi.org/10.1007%2FBF02055756>).
- [4] E. P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium", *Phys. Rev.* 40 (June 1932) 749–759. doi:10.1103/PhysRev.40.749 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.40.749>).
- [5] Curtright, T. L.; Zachos, C. K. (2012). "Quantum Mechanics in Phase Space". *Asia Pacific Physics Newsletter*. 01: 37–46. arXiv:1104.5269
- [6] Cohen, L. (1966). "Generalized Phase-Space Distribution Functions". *Journal of Mathematical Physics*. 7 (5): 781–786. Bibcode:1966JMP.....7..781C (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966JMP.....7..781C>). doi:10.1063/1.1931206 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1931206>).

- [7] G. Baker, "Formulation of Quantum Mechanics Based on the Quasi-probability Distribution Induced on Phase Space," *Physical Review*, 109 (1958) pp. 2198–2206. doi:10.1103/PhysRev.109.2198 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.109.2198>)
- [8] Fairlie, D. B. (1964). "The formulation of quantum mechanics in terms of phase space functions". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 60 (3): 581–586.
- [9] C. L. Mehta "Phase-Space Formulation of the Dynamics of Canonical Variables", *J. Math. Phys.*,5 (1964) pp. 677–686. doi:10.1063/1.1704163 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1704163>)
- [10] M. Oliva, D. Kakofengitis, and O. Steuernagel (2018). "Anharmonic quantum mechanical systems do not feature phase space trajectories". *Physica A*. 502: 201–210. arXiv:1611.03303
- [11] Marinov, M.S. (1991). "A new type of phase-space path integral". *Physics Letters A*. 153 (1): 5–11. Bibcode:1991PhLA..153....5M (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991PhLA..153....5M>). doi:10.1016/0375-9601(91)90352-9 (<https://doi.org/10.1016%2F0375-9601%2891%2990352-9>).
- [12] Curtright, T. L. Time-dependent Wigner Functions (<http://www.physics.miami.edu/~curtright/TimeDependentWignerFunctions.html>)



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Efecto Aharonov-Bohm en espacio de fases.	
<b>Title:</b>	Aharonov-Bohm effect in phase space.	
<b>Supervisor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	cembra@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El efecto Aharonov-Bohm es un fenómeno cuántico en el que la presencia de un campo magnético altera la propagación de una partícula cargada eléctricamente, incluso cuando esta se propaga en zonas donde dicho campo no está presente. Aunque este fenómeno fue descrito por primera vez por Werner Ehrenberg y Raymond Siday en 1949, su nombre se debe a los físicos Yakir Aharonov y David Bohm, que lo descubrieron de forma independiente en 1959.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar el mencionado efecto Aharonov-Bohm en el espacio de fases. La descripción más elegante de la física clásica consiste en su formulación en espacio de fases. Esta formulación, trata en pie de igualdad posiciones y momentos simultáneamente. Sin embargo, desde el artículo de W. Heisenberg en 1927, sobre el denominado principio de incertidumbre, la idea de poder realizar el mismo planteamiento dentro de la física cuántica se puso en cuestión.

La física cuántica sí admite un tratamiento simultáneo de posiciones y momentos. Aunque los primeros trabajos sobre el tema se remontan a los avances de H. Weyl, E. Wigner, H. Groenewold y J. Moyal en los años 30 y 40, la formulación en espacio de fases aún no se ha generalizado en los programas docentes ni en los grados ni en los postgrados de física.

En este trabajo se trata de estudiar el efecto Aharonov-Bohm dentro de una formulación en espacio de fases de la mecánica cuántica.

## **METODOLOGÍA:**

Dentro de este proyecto, el alumno trabajará en la aplicación directa de los conceptos y técnicas impartidas en varias asignaturas obligatorias y de itinerario de grado asociadas a la física cuántica. En este sentido, es muy recomendable que el alumno esté matriculado en (o haya superado) las asignaturas optativas de cuarto: “Mecánica Teórica” y “Campos Cuánticos”.

En particular, el estudiante desarrollará un trabajo fundamentalmente teórico sobre el efecto Aharonov-Bohm. Para ello, establecerá y desarrollará los conceptos básicos de dicho efecto utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, el alumno leerá una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

- [1] H. J. Groenewold, "On the Principles of elementary quantum mechanics", *Physica*, 12 (1946) pp. 405–460. doi:10.1016/S0031-8914(46)80059-4 (<https://doi.org/10.1016%2FS0031-8914%2846%2980059-4>).
- [2] J. E. Moyal, "Quantum mechanics as a statistical theory", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949) pp. 99–124. doi:10.1017/S0305004100000487 (<https://doi.org/10.1017%2FS0305004100000487>).
- [3] H. Weyl, "Quantenmechanik und Gruppentheorie", *Zeitschrift für Physik*, 46 (1927) pp. 1–46, doi:10.1007/BF02055756 (<https://doi.org/10.1007%2FBF02055756>).
- [4] E. P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium", *Phys. Rev.* 40 (June 1932) 749–759. doi:10.1103/PhysRev.40.749 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.40.749>).
- [5] Curtright, T. L.; Zachos, C. K. (2012). "Quantum Mechanics in Phase Space". *Asia Pacific Physics Newsletter*. 01: 37–46. arXiv:1104.5269
- [6] Cohen, L. (1966). "Generalized Phase-Space Distribution Functions". *Journal of Mathematical Physics*. 7 (5): 781–786. Bibcode:1966JMP.....7..781C (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966JMP.....7..781C>). doi:10.1063/1.1931206 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1931206>).
- [7] G. Baker, "Formulation of Quantum Mechanics Based on the Quasi-probability Distribution Induced on Phase Space," *Physical Review*, 109 (1958) pp. 2198–2206. doi:10.1103/PhysRev.109.2198 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.109.2198>)



[8] Fairlie, D. B. (1964). "The formulation of quantum mechanics in terms of phase space functions". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 60 (3): 581–586.

[9] C. L. Mehta "Phase-Space Formulation of the Dynamics of Canonical Variables", *J. Math. Phys.*,5 (1964) pp. 677–686. doi:10.1063/1.1704163  
(<https://doi.org/10.1063%2F1.1704163>)

[10] M. Oliva, D. Kakofengitis, and O. Steuernagel (2018). "Anharmonic quantum mechanical systems do not feature phase space trajectories". *Physica A*. 502: 201–210. arXiv:1611.03303

[11] Marinov, M.S. (1991). "A new type of phase-space path integral". *Physics Letters A*. 153 (1): 5–11. Bibcode:1991PhLA..153....5M  
(<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991PhLA..153....5M>). doi:10.1016/0375-9601(91)90352-9 (<https://doi.org/10.1016%2F0375-9601%2891%2990352-9>).

[12] Curtright, T. L. Time-dependent Wigner Functions  
(<http://www.physics.miami.edu/~curtright/TimeDependentWignerFunctions.html>)



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Propiedades de los mesones más relevantes para las contribuciones hadrónicas al momento magnético anómalo del muon	
<b>Title:</b>	Properties of the most relevant mesons for the hadronic contributions to the muon anomalous magnetic moment	
<b>Supervisor/es:</b>	Juan José Sanz Cillero	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	jjsanzcillero@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	3	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El momento magnético anómalo del muon ( $g_\mu - 2$ ) representa uno de los observables con mayor precisión en física de partículas. Por un lado, es un óptimo lugar para buscar efectos de nueva física, que excedan a lo que se denomina el Modelo Estándar de partículas. Pero por otro lado es un banco de pruebas del Modelo Estándar, que nos exige un conocimiento muy preciso de las propiedades de sus partículas. Sólo así será posible discernir si existe realmente algún efecto de nueva física.

En concreto, las contribuciones hadrónicas al momento magnético anómalo (en sus dos formas, hadronic vacuum polarization y light-by-light scattering) son las responsables de la mayor parte del error en la predicción del Modelo Estándar. Es por ello, muy importante determinar con precisión las amplitudes hadrónicas que contribuyen a  $(g_\mu - 2)$ , así como las propiedades (masa, anchura, etc.) de los principales mesones que intervienen en estas contribuciones como, por ejemplo:

- Primer multiplete de mesones vectoriales:  $\rho, \omega, \phi$
- Multipletes de pseudo-escalares ligeros:  $\pi, \eta, \eta'$

En concreto, en este TFG se propone abordar los siguientes objetivos:

- a. Estudio bibliográfico del problema del cálculo del momento magnético anómalo del muon en el Modelo Estándar y las contribuciones hadrónicas.
- b. Estudio de los procesos hadrónicos básicos que contribuyen al momento magnético anómalo del muon. Estas contribuciones vienen principalmente de la región energética en que la interacción fuerte de QCD es no-perturbativa, requiriendo el uso de teorías efectivas y otras técnicas.
- c. Estudio de las propiedades de los mesones más importantes que intervienen en estas amplitudes hadrónicas. Se observará cómo la masa y la anchura de ciertos mesones son cruciales para las contribuciones hadrónicas al  $(g_\mu - 2)$ . Se estudiarán y compararán con la bibliografía.

#### **METODOLOGÍA:**

Dentro de este proyecto, es muy recomendable que el alumno esté cursando o haya cursado las asignaturas de Partículas Elementales, Campos Cuánticos y Simetrías y Grupos en Física.

Se desarrollará un trabajo principalmente bibliográfico acompañado de algunos cálculos numéricos y manejos de datos básicos. Se aprenderá a estudiar y extraer las propiedades de los mesones a partir del estudio de datos experimentales. Se utilizará principalmente resultados del Lagrangiano efectivo de QCD a bajas energías y otras técnicas matemáticas para la extracción de parámetros hadrónicos.

#### **BIBLIOGRAFÍA:**

The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model,  
T. Aoyama, N. Asmussen, M. Benayoun, J. Bijnens, T. Blum et al., Phys.Rept. 887 (2020) 1-166; e-Print: 2006.04822 [hep-ph]

Update of the ALEPH non-strange spectral functions from hadronic  $\tau$  decays,  
Michel Davier, Andreas Höcker, Bogdan Malaescu, Chang-Zheng Yuan & Zhiqing Zhang, Eur.Phys.J.C 74 (2014) 3, 2803; e-Print: 1312.1501 [hep-ex]

Pade approximants and resonance poles, Pere Masjuan, Juan Jose Sanz-Cillero,  
Eur.Phys.J.C 73 (2013) 2594; e-Print: 1306.6308 [hep-ph]

Review of Particle Physics, P.A. Zyla (Particle Data Group), PTEP 2020 (2020) 8, 083C01



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Buscando nueva física dentro de los muones	
<b>Title:</b>	Searching for new physics within the muons	
<b>Supervisor/es:</b>	Juan José Sanz Cillero	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	jjsanzcillero@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	3	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El momento magnético anómalo del muon ( $g-2$ ) representa una de los observables medidos con mayor precisión en física de partículas. Por este motivo es un óptimo lugar para buscar efectos de nueva física, que excedan a lo que se denomina el Modelo Estándar de partículas. En concreto, se viene observando desde hace años importantes discrepancias entre las mediciones experimentales y las predicciones teóricas que podrían estar indicando la existencia de física más allá del Modelo Estándar. Para ello, es necesario tener un conocimiento preciso de nuestras predicciones, en particular de las contribuciones debidas a las interacciones fuertes de la Cromodinámica Cuántica (QCD).

En concreto, en este TFG se propone abordar los siguientes objetivos:

- Estudio bibliográfico del problema de la discrepancia entre la medición experimental y la predicción teórica del momento magnético anómalo del muon.
- Cálculo de procesos de QCD básicos que contribuyen al momento magnético anómalo del muon. Estas contribuciones vienen principalmente de la región energética en que la interacción fuerte de QCD es no-perturbativa, requiriendo el uso de teorías efectivas.
- Relevancia y análisis numérico de estas contribuciones de QCD al momento magnético anómalo del muon.

**METODOLOGÍA:**

Dentro de este proyecto, es muy recomendable que el alumno esté cursando o haya cursado las asignaturas de Partículas Elementales, Campos Cuánticos y Simetrías y Grupos en Física.

Se desarrollará un trabajo principalmente teórico y bibliográfico, acompañado por algunos cálculos y manejos de datos básicos. Se aprenderá a manejar con soltura el cálculo de diagramas de Feynman a nivel árbol y al nivel de un *loop* en procesos básicos. Se utilizará resultados de QCD perturbativo y del Lagrangiano efectivo de QCD a bajas energías.

**BIBLIOGRAFÍA:**

Pseudoscalar pole light-by-light contributions to the muon  $(g-2)(g-2)(g-2)$  in Resonance Chiral Theory, [A. Guevara](#), [P. Roig](#) & [J.J. Sanz-Cillero](#), *JHEP* 06 (2018) 160; e-Print: [1803.08099](#) [hep-ph]

The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, T. Aoyama, N. Asmussen, M. Benayoun, J. Bijnens, T. Blum et al., *Phys.Rept.* 887 (2020) 1-166; e-Print: [2006.04822](#) [hep-ph]

Update of the ALEPH non-strange spectral functions from hadronic  $\tau$  decays, Michel Davier, Andreas Höcker, Bogdan Malaescu, Chang-Zheng Yuan & Zhiqing Zhang, *Eur.Phys.J.C* 74 (2014) 3, 2803; e-Print: [1312.1501](#) [hep-ex]

Rho meson properties in the chiral theory framework, J.J. Sanz-Cillero & A. Pich, *Eur.Phys.J.C* 27 (2003) 587-599; e-Print: [hep-ph/0208199](#) [hep-ph]



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Violación de la simetría CP en el LHC	
<b>Title:</b>	CP-symmetry violation at the LHC	
<b>Supervisor/es:</b>	José Ramón Peláez Sagredo	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	jrpelaez@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

- Estudiar la formulación matemática de la simetría CP entre partículas y antipartículas y como se mantiene en todas las interacciones fundamentales menos la electrodébil.
- Comprender como la observación de su violación requiere la interferencia de dos procesos.
- Entender los distintos tipos de violación de CP en función de en qué parte del proceso se originan.
- Describir las observaciones de esta violación que se han realizado en distintas reacciones en el Large Hadron Collider del CERN, prestando especial atención a los últimos resultados.

### METODOLOGÍA:

Lectura de capítulos de libros y/o publicaciones científicas propuestas en la bibliografía y relacionadas con los objetivos propuestos.

En algunos pasos, se solicitará que el alumno o alumna realice algún cálculo, comprobación o simulación utilizando un programa del tipo de Mathematica.

### BIBLIOGRAFÍA:

- D.H. Perkins, Introduction to High Energy Physics Cambridge University Press, (4th Edition, 2000)

- The Review of Particle Physics (2020). P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).
- Bigi, I.I. A. I. Sanda, CP Violation. Cambridge University Press (2009)
- G.C.Branco, L. Lavoura, J.P. Silva, CP Violation, Clarendon Press, Oxford, (1999).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo 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>Supervisor/es:</b>	Luis J. Garay	
<b>E-mail supervisor/es</b>	<a href="mailto:luisj.garay@ucm.es">luisj.garay@ucm.es</a>	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### 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 del efecto Unruh tanto en espaciotiempos planos como curvos y la radiación de Hawking en los procesos de colapso gravitatorio completo. Adicionalmente se analizará el papel que desempeña el tensor de energía-momento renormalizado en estos procesos. Uno de los objetivos fundamentales de este trabajo es identificar las dificultades inherentes al proceso de cuantización de campos relativistas así como considerar las diferentes maneras que se han propuesto para abordarlas.

### 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:

- N.D. Birrell, P.C.W. Davies, Quantum fields in curved space, Cambridge University Press, 1982.
- R. Wald, Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics, University of Chicago Press, 1994.
- A. Fabbri, J. Navarro-Salas, Modeling black hole evaporation, World Scientific, 2005.





# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	FÍSICA TEÓRICA
<b>Título:</b>	Propiedades de Estrellas Relativistas: ecuaciones de estado, estabilidad, modos cuasi-normales y radiación gravitacional.
<b>Title:</b>	Properties of Relativistic Stars: equations of state, stability, quasi-normal modes and gravitational radiation.
<b>Supervisor/es:</b>	Luis Manuel González Romero
<b>E-mail Supervisor/es</b>	mgromero@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El objetivo del trabajo es el estudio de las propiedades de las estrellas de neutrones y su descripción dentro de la teoría de la Relatividad General.

Se deberán estudiar cuales son las características básicas observacionales de estas estrellas de neutrones, obtenidas de las observaciones de pulsares. Se estudiará que tipo de modelos se utilizan para describir estos objetos dentro de la Relatividad General.

El trabajo puede incluir la obtención de modelos numéricos sencillos con ordenador con simetría esférica y el cálculo de modos de oscilación de las estrellas relativistas.

Con todo ello se podrá analizar la estabilidad y la radiación gravitacional emitidas en estas oscilaciones (modos cuasi-normales). El análisis de estos modos cuasi-normales permite obtener información sobre el interior de las estrellas de neutrones (asterosismología)

### METODOLOGÍA:

Estudio de la bibliografía básica recomendada y utilización de programas de cálculo numérico y/o simbólico para la construcción de modelos.

### BIBLIOGRAFÍA:

1. J.B. Hartle, Gravity. An Introduction to Einstein's General Relativity, Addison Wesley, 2003.
2. B.F. Schutz, A first course in general relativity, Cambridge University Press, 1985.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	FÍSICA TEÓRICA	
<b>Título:</b>	Propiedades de Estrellas Relativistas: Ecuaciones de estado, rotación y Relaciones ILoveQ.	
<b>Title:</b>	Properties of Relativistic Stars: Equations of State, rotation and ILoveQ relations.	
<b>Supervisor/es:</b>	Luis Manuel González Romero	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	mgromero@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El objetivo del trabajo es el estudio de las propiedades de las estrellas de neutrones y su descripción dentro de la teoría de la Relatividad General.

Se deberán estudiar cuales son las características básicas observacionales de estas estrellas de neutrones, obtenidas de las observaciones de pulsares. Se estudiará que tipo de modelos se utilizan para describir estos objetos dentro de la Relatividad General.

El trabajo puede incluir la obtención de modelos numéricos sencillos con ordenador con simetría esférica y en rotación lenta para la obtención de relaciones universales (independientes de la ecuación de estado), del tipo ILoveQ.

### METODOLOGÍA:

Estudio de la bibliografía básica recomendada y utilización de programas de cálculo numérico y/o simbólico para la construcción de modelos.

### BIBLIOGRAFÍA:

1. J.B. Hartle, Gravity. An Introduction to Einstein's General Relativity, Addison Wesley, 2003.
2. B.F. Schutz, A first course in general relativity, Cambridge University Press, 1985.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	FÍSICA TEÓRICA	
<b>Título:</b>	Introducción a gravedad cuántica	
<b>Title:</b>	Introduction to quantum gravity	
<b>Supervisor/es:</b>	Mercedes Martín Benito	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	<a href="mailto:m.martin.benito@ucm.es">m.martin.benito@ucm.es</a>	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

El principal objetivo de este trabajo es introducirse en el problema de la cuantización de la gravedad. Para ello primero revisaremos las distintas motivaciones que llevan a tratar de construir un formalismo cuántico para el campo gravitatorio, así como las principales dificultades que existen a la hora de abordar la cuantización de la gravedad, y cómo el intento de superarlas da lugar a diferentes puntos de vista y formalismos. Después nos centraremos, como formalismo particular, en la cuantización canónica de la relatividad general y abordaremos el análisis de un modelo sencillo.

### METODOLOGÍA:

Estudio del estatus actual del tema a través de la bibliografía recomendada y de algunos artículos científicos de revisión especializados.

Se recomienda haber cursado o estar cursando “Mecánica Cuántica”, “Mecánica Teórica”, “Relatividad General y Gravitación” y “Campos Cuánticos”.

### BIBLIOGRAFÍA:

- R. Wald, General Relativity, University of Chicago Press, 1984.
- P.A. Dirac, Lectures on Quantum Mechanics, Dover Publications, 2001.
- Approaches to Quantum Gravity, edited by Daniele Oriti, Cambridge University Press, 2009.
- 100 Years of General Relativity: volume 4 (Loop Quantum Gravity: the first 30 years). Editores: Abhay Ashtekar & Jorge Pullin, World Scientific, 2017.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Efecto Gibbs: un análisis sin series de Fourier trigonométricas pero con series de Fourier generalizadas.	
<b>Title:</b>	Gibbs effect: an study based on generalized Fourier series but not on trigonometric Fourier series.	
<b>Supervisor/es:</b>	María Jesús Rodríguez Plaza	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	mjrplaza@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Estudiar el efecto Gibbs en series de Fourier de los polinomios de Chebyshev y de Legendre, así como en series de Bessel.

### METODOLOGÍA:

Tras leer unas referencias básicas y utilizando programas de manipulación algebraica el alumno será capaz de entender en detalle el fenómeno de Gibbs en funciones sencillas con discontinuidad de tipo salto o escalón cuando éstas se desarrollan en las series indicadas en el párrafo anterior. El estudio se complementará con los dos métodos históricos más sencillos para hacer desaparecer dicho efecto.

El trabajo será analítico y numérico (experimentos matemáticos).

### BIBLIOGRAFÍA:

Gottlieb, D. and Shu, C-W. On the Gibbs phenomenon and its resolution. SIAM Rev, **39** (4), 644-668.

Jerri, A.J., The Gibbs Phenomenon in Fourier Analysis, Splines and Wavelet Approximations. Springer Science and Business Media, 1998



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Departamento de Física Teórica	
<b>Título:</b>	Modelos de inflación cósmica y observaciones	
<b>Title:</b>	Models of Cosmological Inflation and Observations	
<b>Supervisor/es:</b>	Dr. Mindaugas Karčiauskas	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	mindauka@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	5	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Comprensión de los diferentes modelos de inflación cosmológica, desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo, y de su comparación con las observaciones de la radiación de fondo de microondas.

### METODOLOGÍA:

Se considerarán los modelos de inflación cósmica formulados usando un sólo campo escalar. Para cada potencial del campo, es decir, para cada modelo particular, se realizará el siguiente estudio:

1. Obtención de los parámetros de "slowroll", necesarios para describir un periodo inflacionario.
2. Cálculo del índice espectral escalar y de la amplitud de las ondas gravitacionales.
3. Comparación de los resultados del apartado anterior con las restricciones obtenidas por las mediciones del satélite Planck de la radiación de fondo de microondas.

### BIBLIOGRAFÍA:

1. Coles P. and Lucchin F. "Cosmology: the origin and evolution of cosmic structure", Wiley, 1995
2. David H. Lyth and Andrew R. Liddle, "The Primordial Density Perturbation: Cosmology, Inflation and the Origin of Structure", Cambridge University Press, 2009
3. Scott Dodelson, "Modern Cosmology", Academic Press 2003
4. Steven Weinberg, "Cosmology", Oxford University Press, 2008

5. P.A.R Ade et al., "Planck 2013 results. XXII. Constraints on inflation", *Astron.Astrophys.* 571 (2014) A22

6. Y. Akrami et al., "Planck 2018 results. X. Constraints on inflation", arXiv:1807.06211 [astroph.CO]



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>DEPARTAMENTO:</b>	Física Teórica	
<b>TÍTULO:</b>	Ondas en el agua	
<b>TITLE:</b>	Water Waves	
<b>SUPERVISOR/ES:</b>	Manuel Mañas Baena	
<b>e-mail Supervisor/es</b>	manuel.manas.baena@gmail.com	
<b>NÚMERO DE PLAZAS:</b>	2	
<b>ASIGNACIÓN DE TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Entender los principios físicos y técnicas matemáticas para la descripción y análisis de las ondas en el agua.

### METODOLOGÍA:

Para las ecuaciones de Euler para un fluido ideal irrotacional se considera un problema de frontera libre para la ola en el agua. Aplicando técnicas de escalas múltiples se deriva la ecuación de Korteweg-de Vries para ondas longitudinales en aguas someras, y la ecuación de Kadomtsev-Petviashvili para el caso en que se permita una transversalidad débil. Estudio del caso de aguas profundas y la ecuación de Schrödinger no lineal.

La metodología es el estudio de temas seleccionada de la bibliografía y búsqueda bibliográfica adicional.

### BIBLIOGRAFÍA:

- Mark J. Ablowitz, Nonlinear Dispersive Waves. Cambridge University Press (2011).
- R. S. Johnson, A Modern Introduction to the Mathematical Theory of Water Waves, Cambridge University Press (1997).
- G. K. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press (2007).
- Sir Horace Lamb, Hydrodynamics, Dover (1945).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Computación Cuántica Topológica: Una Introducción	
<b>Title:</b>	Topological Quantum Computation: an introduction	
<b>Supervisor/es:</b>	Miguel A. Martín-Delgado	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	mardel@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Hacer una introducción a la teoría de la computación cuántica topológica mostrando cuáles son los principios y relación con la mecánica cuántica.

Estudiar cómo la topología ayuda a la construcción de ordenadores cuánticos robustos frente a la descoherencia y al ruido externo. Estudiar modelos simples con topología cuántica como el modelo de Kitaev y los códigos topológicos de color. Mostrar su relación con nuevas fases cuánticas de la materia llamadas órdenes topológicos y con la existencia de anyones. 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.

<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/giccucm/index.php/GICC.html>

### BIBLIOGRAFÍA:

- 1) Physics World. Ejemplar de la revista de Marzo, 1998
- 2) "Information and Computation: Classical and Quantum aspects" Galindo, A., Martín-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 2021-22

## Ficha de Trabajo 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>Supervisor/es:</b>	Miguel A. Martín-Delgado	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	mardel@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	2	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### 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.

<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/giccucm/index.php/GICC.html>

### BIBLIOGRAFÍA:

- 1) Physics World. Ejemplar de la revista de Marzo, 1998
- 2) "Information and Computation: Classical and Quantum aspects" Galindo, A., Martín-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 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	FÍSICA TEÓRICA	
<b>Título:</b>	Dinámica clásica de cuerdas relativistas	
<b>Title:</b>	Classical dynamics of relativistic strings	
<b>Supervisor/es:</b>	Rafael Hernández Redondo	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	rafael.hernandez@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	3	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

La Teoría de Cuerdas juega un papel predominante en numerosos problemas en Física Teórica y Física Matemática. En este Trabajo de Fin de Grado se propone obtener un primer contacto con algunos de sus aspectos más elementales. Los objetivos del trabajo son

1. Analizar las ecuaciones de movimiento para una cuerda no relativista en la formulación Lagrangiana, y las condiciones de contorno de tipo Neumann y de tipo Dirichlet.
2. Extender la acción relativista para una partícula puntual a una cuerda. La acción de Nambu-Goto. Cuerdas abiertas y cuerdas cerradas.
3. Analizar la invariancia bajo reparametrizaciones de la acción de Nambu-Goto y obtener las ecuaciones de movimiento para una cuerda relativista.
4. Estudiar las condiciones de contorno de tipo Neumann y de tipo Dirichlet. Branas de Dirichlet.
5. Analizar e interpretar el significado físico de las ecuaciones de movimiento de la cuerda.

### METODOLOGÍA:

El alumno se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de libros y artículos científicos introductorios relacionados con los objetivos propuestos. El trabajo incluirá la resolución de ejercicios y problemas. Se facilitará el acceso a la bibliografía más relevante.

### BIBLIOGRAFÍA:

- J. Scherk, "An introduction to the theory of dual models and strings", Rev. Mod. Phys. 47

(1975), 123.

- M. B. Green, J. H. Schwarz and E. Witten, "Superstring Theory. Vol. 1: Introduction". Cambridge University Press, 1987.

- J. Polchinski, "String duality: a colloquium", Rev. Mod. Phys. 68 (1996), 1245. "String Theory. Vol. 1: An Introduction to the Bosonic String". Cambridge University Press, 1998.

- B. Zwiebach, "A First Course in String Theory". Cambridge University Press, 2004.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Geometría del monopolo magnético	
<b>Title:</b>	Geometry of the magnetic monopole	
<b>Supervisor/es:</b>	Rafael Hernández Redondo	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	rafael.hernandez@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

- Estudio de la solución de monopolo de Dirac a las ecuaciones de Maxwell. Obtener la condición de cuantización de Dirac y la dualidad eléctrica-magnética.
- Analizar la descripción de Wu y Yang de la estructura topológica del monopolo de Dirac. Descripción del monopolo como un fibrado principal.
- Extender el análisis en términos de fibrados principales al instantón de Yang-Mills.
- Estudiar el monopolo de 't Hooft-Polyakov y su relación con los grupos de homotopía.

### METODOLOGÍA:

El alumno se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de libros y artículos científicos introductorios relacionados con los objetivos propuestos. El trabajo incluirá la resolución de ejercicios y problemas. Se facilitará el acceso a la bibliografía más relevante.

### BIBLIOGRAFÍA:

- P. A. M. Dirac, "Quantized Singularities in the Electromagnetic Field", Proc. Roy. Soc. Lond. A 133, (1931) 60.
- P. Goddard and D. I. Olive, "New Developments in the Theory of Magnetic Monopoles", Rept. Prog. Phys. 41 (1978) 1357.
- T. Eguchi, P. B. Gilkey and A. J. Hanson, "Gravitation, Gauge Theories and Differential Geometry", Phys. Rept. 66 (1980) 213.
- M. Nakahara, "Geometry, Topology and Physics", Graduate Student Series in Physics, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Métodos de Montecarlo modernos para sistemas de espines	
<b>Title:</b>	Modern Monte Carlo methods for spin systems	
<b>Supervisor/es:</b>	Víctor Martín Mayor	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	vicmarti@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	1	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

En este trabajo se estudiarán las propiedades de las cadenas de Markov y su uso en simulaciones de Monte Carlo en Física. Se aprenderá a caracterizar series temporales estocásticas, y a discriminar la calidad de los diferentes algoritmos de Montecarlo atendiendo a dicha caracterización. Con el fin de comprender los métodos modernos de simulación, estudiaremos conceptos de Mecánica Estadística que no se estudian en el grado en Física (construcción de Fortuin-Kasteleyn, y series de alta/baja temperatura). El trabajo permitirá, además, implementar de manera eficiente dichos algoritmos.

### METODOLOGÍA:

Tras el correspondiente estudio de la bibliografía, se implementará de manera eficiente (en lenguaje C) los algoritmos de simulación y análisis de datos estudiados. Estos programas se utilizarán en simulaciones de Monte Carlo (unas 1000 horas de CPU), para obtener resultados de alta calidad estadística, que permitan una discusión detallada de la calidad de los diferentes algoritmos.

### BIBLIOGRAFÍA:

Alan Sokal, *Simulations of Statistical Mechanics Models* (Les Houches lecture, 2005)  
Daniel Amit and Víctor Martín Mayor, *Field Theory, the Renormalization Group and Critical Phenomena*, (3<sup>rd</sup> edition, 2005, World Scientific Singapore).  
Youijing Deng et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 110601 (2007).  
U. Wolff, *Nucl. Phys. B* **810**, 491 (2009).  
Lei Zhang et al., *Phys. Rev. Lett.* **125**, 200603 (2020).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Ondas gravitatorias y su detección	
<b>Title:</b>	Gravitational waves and its detection	
<b>Supervisor/es:</b>	Antonio Dobado	
<b>E-mail supervisor/es</b>	<a href="mailto:dobado@fis.ucm.es">dobado@fis.ucm.es</a>	
<b>Número de plazas:</b>	3	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input type="checkbox"/>	Selección por expediente <input checked="" type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Obtener una comprensión teórica de las ondas gravitatorias en el contexto de la relatividad general. Mecanismos de producción astrofísicos y cosmológicos, así como de los sistemas que han permitido su descubrimiento y el estudio de sus propiedades. Potencial como herramienta de observación astrofísica.

### METODOLOGÍA:

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

### BIBLIOGRAFÍA:

C. W. Misner, K. S. Thorne and J. A. Wheeler, 1973, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco.

T. Padmanabhan, 2010, *Gravitation*, Cambridge University Press.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Neutrinos. Oscilaciones, masas, naturaleza y violación de CP	
<b>Title:</b>	Neutrinos. Oscillations, masses, nature and CP violation.	
<b>Supervisor/es:</b>	Antonio Dobado	
<b>E-mail supervisor/es</b>	dobado@fis.ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	3	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input type="checkbox"/>	Selección por expediente <input checked="" type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Obtener una comprensión actualizada de los aspectos más relevantes de la fenomenología de los neutrinos y su descripción teórica.

### METODOLOGÍA:

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

### BIBLIOGRAFÍA:

Neutrino physics - Theory, Walter Grimus (Jul 11, 2003)

*Lect. Notes Phys.* 629 (2004) 169-21441st Internationale Universitaetswochen fur Theoretische Physik (International University School of Theoretical Physics): Flavor Physics (IUTP 41), 169-21, e-Print: hep-ph/0307149 [hep-ph]



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2021-22

## Ficha de Trabajo Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica	
<b>Título:</b>	Perturbaciones de objetos compactos en teorías alternativas de gravedad: agujeros negros, estrellas de neutrones y agujeros de gusano	
<b>Title:</b>	Perturbations of compact objects in alternative theories of gravity: black holes, neutron stars and wormholes	
<b>Supervisor/es:</b>	José Luis Blázquez Salcedo	
<b>E-mail Supervisor/es</b>	jlblaz01@ucm.es	
<b>Número de plazas:</b>	5	
<b>Asignación de TFG:</b>	Selección directa <input type="checkbox"/>	Selección por expediente <input checked="" type="checkbox"/>

### OBJETIVOS:

Con la detección de ondas gravitatorias por la colaboración LIGO/VIRGO se ha iniciado una nueva edad dorada en el estudio de objetos compactos y gravitación. Eventos como la colisión de agujeros negros o estrellas de neutrones, ya son observables. Estos fenómenos emiten ondas gravitacionales que presentan distintas fases.

Con este trabajo se persigue introducir al alumno en el estudio teórico de las ondas gravitacionales emitidas por objetos compactos, en particular en la fase final de la onda conocida como “ringdown”. Esta fase se caracteriza por un espectro de frecuencias y tiempos de decaimiento que se puede estudiar, desde el punto de vista teórico, utilizando teoría de perturbaciones y analizando los modos cuasinormales. En teorías alternativas de la gravedad, este espectro puede ser diferente al predicho por la teoría de la Relatividad General, y la comparación de las predicciones teóricas con las futuras detecciones puede ser de gran valor a la hora de constreñir o testear una teoría alternativa.

El objetivo del trabajo es aprender a utilizar las herramientas perturbativas necesarias para analizar los modos cuasinormales, y aplicarlo en el contexto de teorías alternativas de la gravedad.



## **METODOLOGÍA:**

Cada estudiante se concentrará en una clase de objetos diferente: agujeros negros, estrellas de neutrones, agujeros de gusano, etc.

Se empezará con un estudio de las perturbaciones no-radiales de configuraciones esféricamente simétricas y estáticas en Relatividad General. Posteriormente se generalizará a configuraciones en teorías alternativas, donde principalmente nos enfocaremos a teorías que introducen campos escalares adicionales. Se estudiarán perturbaciones gravitatorias, electromagnéticas y escalares.

Una vez obtenidas las perturbaciones, se procederá a su estudio con técnicas semi-analíticas y numéricas. Se analizarán las diferentes componentes del espectro de modos cuasinormales, la frecuencia de oscilación y tiempo de decaimiento de las perturbaciones, su desviación con respecto a los valores predichos por Relatividad General, estabilidad, etc...

Se recomienda haber cursado la asignatura de *Relatividad General*.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

- ) "Gravitation". C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler; Princeton University Press (1974). ISBN 978-0-7167-0344-0.
- ) "Quasi-Normal Modes of Stars and Black Holes". K.D. Kokkotas, B.G. Schmidt, Living Rev. Relativ. 2, 2 (1999). <https://doi.org/10.12942/lrr-1999-2>
- ) "Quasinormal modes of black holes and black branes". E. Berti, V. Cardoso, A. O. Starinets, Class.Quant.Grav. 26, 163001 (2009). arXiv:0905.2975 [gr-qc]
- ) "Quasinormal modes of black holes: from astrophysics to string theory". R. Konoplya, A. Zidenko, Rev.Mod.Phys.83:793-836 (2011). arXiv:1102.4014 [gr-qc]
- ) "Quasinormal modes of compact objects in alternative theories of gravity" J.L. Blázquez-Salcedo, Z.A. Motahar, D.D. Doneva, F.S. Khoo, J. Kunz, S. Mojica, K.V. Staykov, S.S. Yazadjiev, Eur. Phys. J. Plus 134: 46 (2019). arXiv:1810.09432 [gr-qc]