FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Introducción a la Física de Agujeros Negros
Title:	Introduction to Black Hole Physics
Tutor/es:	Diego Rubiera-Garcia
E-mail tutor/es:	drubiera@ucm.es
Número de plazas:	5
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Digerir un conjunto de conocimientos básicos sobre las propiedades geométricas, físicas, y observacionales más relevantes de los agujeros negros.

Desarrollar en profundidad una temática especializada de agujeros negros.

Conseguir una primera toma de contacto con los modos de trabajo modernos.

Metodología:

En una primera fase se proporcionará material propio recorriendo los aspectos más fundamentales de la física de agujeros negros: soluciones clásicas, horizontes, movimiento geodésico, esferas de fotones, soluciones dinámicas, colapso gravitacional, termodinámica/radiación Hawking, ondas gravitacionales, búsquedas observacionales, singularidades espacio-temporales, objetos exóticos…

En una segunda fase el alumno escogerá a voluntad un tema de su interés, para profundizar en él, proporcionándole al efecto material complementario. Dicha temática especializada constituirá la base del TFG final.

Bibliografía:

M. Hobson, ``General Relativity".

T. Ortin, ``Gravity and Strings" (temas 7 y 8).

R. M. Wald, ``General Relativity".

T. Padmanabhan, ``Gravitation. Foundations and Frontiers".

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Perturbaciones de objetos compactos en teorías gravitatorias: agujeros negros, estrellas de neutrones y agujeros de gusano
Title:	Perturbations of compact objects in theories of gravity: black holes, neutron stars and wormholes
Tutor/es:	Fech Scen Khoo, José Luis Blázquez Salcedo
E-mail tutor/es:	fkhoo@ucm.es, jlblaz01@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

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 con simetría esférica 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 semianalíticas 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]

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Agujeros negros en rotación
Title:	Rotating black holes
Tutor/es:	Francisco Navarro Lérida
E-mail tutor/es:	fnavarro@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

- Familiarización del alumno con la noción de agujero negro.
- Aprender la noción de cargas fundamentales de un agujero negro: masa, momento angular y carga eléctrica (teorema de no pelo).
- Estudio de las soluciones de tipo agujero negro más relevantes: Schwarzschild (estática (masa)), Kerr (rotante (masa y momento angular)), Reissner–Nordström (estática cargada (masa y carga eléctrica)) y Kerr-Newman (rotante cargada (masa, momento angular y carga eléctrica).
- Análisis de los efectos de la rotación en agujeros negros: deformación del horizonte de sucesos, aparición de ergo-regiones, arrastre de inerciales, efecto de lente gravitacional asimétrica, ...
- (Opcional) Generalización de la idea de rotación a dimensiones mayores (agujero negro de Myers-Perry).

Metodología:

- Estudio de las referencias y la bibliografía básicas.
- Aprendizaje del uso de los paquetes DifferentialGeometry y Tensor de Maple para estudiar métricas en Relatividad General.
- Aprendizaje del cálculo de propiedades físicas de un agujero negro a partir de su métrica.
- Elaboración de una memoria científica de los resultados obtenidos.
- Se recomienda haber cursado o estar cursando las asignaturas "Relatividad General" y “Electrodinámica Clásica”.

Bibliografía:

- C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, "Gravitation", Freeman (1973).
- S. Carroll, ”Spacetime Geometry: An introduction to General Relativity”, Pearson International New Edition (2013).
- M. Heusler, "Black Hole Uniqueness Theorems", Cambridge University Press (1996).
- R. P. Kerr, Phys. Rev. Lett. 11, 237 (1963).
- E. Newman, E. Couch, K. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash, and R. Torrence, J. Math. Phys. 6, 918 (1965).
- R. C. Myers and M. J. Perry, Annals Phys. 172, 304 (1986).

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	De la inflación cosmológica a la matería oscura
Title:	From inflation to dark matter
Tutor/es:	Javier Rubio
E-mail tutor/es:	javier.rubio@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo estudiar cómo ciertos escenarios inflacionarios del Universo temprano pueden dar lugar a una amplificación de las perturbaciones primordiales a pequeña escala, favoreciendo la formación de agujeros negros primordiales u otros objetos compactos tras la reentrada en el horizonte.

El proyecto introducirá al estudiante en la física básica de la inflación y en la generación de perturbaciones cosmológicas, para después analizar las condiciones necesarias para que estas alcancen amplitudes suficientemente grandes como para inducir colapso gravitatorio. Según el desarrollo del trabajo, podrán estudiarse también las implicaciones cosmológicas de estos objetos como posibles contribuyentes a la materia oscura o como fuente de señales observacionales indirectas.

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. 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.

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Ondas gravitatorias de agujeros negros y otros objetos compactos
Title:	Gravitational waves of black holes and other compact objects
Tutor/es:	José Luis Blázquez Salcedo, Pablo Navarro Moreno
E-mail tutor/es:	jlblaz01@ucm.es, panava03@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

El trabajo tiene como objetivo el estudio de las propiedades de objetos compactos como los agujeros negros y las estrellas de neutrones. En concreto, se estudiaran las ecuaciones que describen las ondas gravitatorias emitidas tras la colisión de los objetos compactos. El trabajo tiene una parte teórica, donde se obtendrán y analizaran las ecuaciones que describen el objeto y la radiación gravitatoria, y una segunda parte donde se resolverán numéricamente las ecuaciones para extraer los datos.

Metodología:

El estudio se comenzará realizando perturbaciones generales de configuraciones sencillas Relatividad General, por ejemplo el agujero negro de Schwarzschild o estrellas de neutrones con densidad constante. A continuación se puede plantear la generalización a objetos más complejos, por ejemplo con rotación o con campos adicionales que resulten de introducir materia exótica o teorías alternativas.

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]
-) "Black hole spectroscopy: from theory to experiment", Berti et al, e-Print: 2505.23895 [gr-qc]

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Ondas Gravitacionales: Agujeros Negros, Estrellas de Neutrones
Title:	Gravitational Waves: Black Holes, Neutron Stars,...
Tutor/es:	Luis Manuel González Romero
E-mail tutor/es:	mgromero@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

El objetivo del trabajo es el estudio de las propiedades de los agujeros negros y/o las estrellas de neutrones y su descripción dentro de la teoría de la relatividad general o teorías alternativas.
El trabajo incluye la obtención de modelos numéricos con ordenador, utilizando lenguajes de programación (Maple, Python, Matlab,...).
Las oscilaciones no radiales de los agujeros negros y las estrellas de neutrones pueden emitir ondas gravitacionales. En el trabajo se analizarán las propiedades de dichas ondas gravitacionales y su relación con las detecciones del observatorio LIGO.

Metodología:

Estudio de la bibliografía sobre el tema 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. V. Ferrari, L. Gualtieri, P. Pani, General Relativity and its Applications, CRC Press, 2021.
3. K. D. Kokkotas, B. G. Schmidt, Quasi-normal Modes of Stars and Black Holes, Living Reviews in Relativity 2:2,1999. (https://doi.org/10.12942/lrr-1999-2).
4. J.L. Blázquez-Salcedo, F. S. khoo, J. Kunz, L.M. González-Romero, Quasinormal modes of Kerr black holes using a spectral decomposition of the metric perturbation. Phys. Rev. D 109, 064028 (2024) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.064028 .
5. F. S. Khoo et al, Quasinormal modes of rapidly rotating Ellis-Bronnikov wormholes. Phys. Rev. D 109, 084013 (2024) (https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.084013) .
6. J. Mena-Fernández, L.M: González-Romero, Reconstruction of the neutron star equation of state from w-quasinormal modes spectra with a piecewise polytropic meshing and refinement method. Phys. Rev. D 99, 104005 (2019). (https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.104005).

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Ondas gravitatorias, su detección y fuentes astrofísicas.
Title:	Gravitational waves, their detection and astrophysical sources.
Tutor/es:	Antonio Dobado González
E-mail tutor/es:	dobado@fis.ucm.es
Número de plazas:	3
Asignación de TFG:	Asignación por expediente

Objetivos:

Obtener una compresión 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.

Es muy recomendable que los alumnos interesados en este TFG cursen también la asignatura de Relatividad General y Gravitación.

Metodología:

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

El trabajo puede enfocarse desde el punto de vista teórico o desde el punto de vista de detección de ondas gravitacionales.

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.

M. Maggiore, 2008, *Gravitational Waves*, Oxford University Press. Vol. I.

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Geometría del monopolo magnético
Title:	Geometry of the magnetic monopole
Tutor/es:	Rafael Hernández Redondo
E-mail tutor/es:	rafael.hernandez@fis.ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación por expediente

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.

Tras los aspectos generales en la construcción de supersimetría, uno de los trabajos se orientará hacia

- Estudiar el monopolo de ´t Hooft-Polyakov y su relación con los grupos de homotopía.

El otro trabajo se orientará hacia

-Estudiar la electrodinámica de las soluciones de monopolo.

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. 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.

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Introducción a la supersimetría
Title:	Introduction to Supersymmetry
Tutor/es:	Rafael Hernández Redondo
E-mail tutor/es:	rafael.hernandez@fis.ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación por expediente

Objetivos:

- Motivación física: Analizar las limitaciones del Modelo Estándar, centrándose específicamente en el problema de la jerarquía y la estabilidad de la masa del bosón de Higgs.
- Fundamentos matemáticos: Estudiar el álgebra de gradación de Lie y las extensiones del grupo de Poincaré (teoremas de Coleman-Mandula y Haag-Lopuszanki-Sohnius).
- Construcción de modelos: Comprender el formalismo de supercampos y superespacio para construir lagrangianos invariantes bajo transformaciones de supersimetría.

Tras los aspectos generales en la construcción de supersimetría, uno de los trabajos se orientará hacia
-Fenomenología: Estudiar el contenido de partículas del Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo y las implicaciones de la ruptura de supersimetría.
El otro trabajo se orientará hacia
-Supergravedad: Aplicación del formalismo de teorías supersimétricas a teorías de gravedad.

Metodología:

El trabajo consistirá en una revisión bibliográfica crítica y un desarrollo teórico-deductivo. Se comenzará con el estudio de las representaciones de espín para entender los supermultipletes. Posteriormente, se realizarán cálculos detallados sobre el modelo de Wess-Zumino como prototipo de teoría supersimétrica. Finalmente, se analizarán los datos actuales del LHC respecto a la búsqueda de partículas compañeras (sparticles) para contrastar la teoría con la evidencia experimental actual.

Bibliografía:

- Wess, J. and Bagger, J., "Supersymmetry and Supergravity", Princeton University Press (1992).
- Martin, S. P. "A Supersymmetry Primer", Advaced Series on Directions in High Energy Physics (1997).
- Terning, J., "Modern Supersymmetry: Dynamics and Duality", Oxford University Press (2006).