



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Perturbaciones de agujeros negros en teorías alternativas de gravedad
Title:	Perturbations of black holes in alternative theories of gravity
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. Las posibles direcciones que podrá tomar el trabajo son las siguientes:

- Estudio de los distintos tipos de perturbaciones de agujeros negros: perturbaciones de la métrica axiales, polares o escalares.
- Propiedades de agujeros negros con "pelo", por ejemplo en el caso de agujeros negros con campos escalares masivos. También se podrían estudiar distintos tipos de potencial.
- Propiedades de agujeros negros en la teoría de Einstein-Gauss-Bonnet
- Propiedades de agujeros negros en la teoría de Einstein-dynamical-Chern-Simons
- Estudio de distintos métodos numéricos para el cálculo del espectro de modos cuasinormales y otras propiedades de los agujeros negros.

Metodología:

El curso comenzará con el estudio de las perturbaciones no radiales de agujeros negros esféricamente simétricos y estáticos en la Relatividad General. Posteriormente, se generalizará a teorías alternativas, centrándose principalmente en aquellas que introducen campos escalares adicionales. Se estudiarán perturbaciones gravitacionales, electromagnéticas y escalares. Una vez obtenidas las ecuaciones de perturbación, se estudiarán mediante técnicas semianalíticas y numéricas. Se analizarán las diferentes componentes del espectro de modos cuasinormales, la frecuencia de oscilación y el tiempo de decaimiento de las perturbaciones, su desviación de los valores predichos por la Relatividad General, su estabilidad, etc. Se recomienda que los estudiantes hayan cursado Relatividad General y posean conocimientos básicos de programación.

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 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Propiedades de objetos compactos en teorías alternativas de gravedad
Title:	Properties of compact objects in alternative theories of gravity
Tutor/es:	José Luis Blázquez Salcedo, Francisco Navarro Lérída
E-mail tutor/es:	jlblaz01@ucm.es, fnavarro@ucm.es
Número de plazas:	1
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 los objetos compactos y de la 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 los objetos compactos. El objetivo del trabajo es aprender a utilizar las herramientas analíticas y numéricas necesarias para modelar objetos compactos en teorías alternativas de gravedad y estudiar sus propiedades.

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 y teorías alternativas.
- Aprendizaje del cálculo de propiedades físicas de un objeto compacto a partir de su métrica y de su espectro de modos cuasinormales.
- Elaboración de una memoria científica de los resultados obtenidos.
- Se recomienda haber cursado o estar cursando las asignaturas de Relatividad General, Electrodinámica Clásica, Física Computacional y Geometría Diferencial y Cálculo Tensorial.

Bibliografía:

- C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, "Gravitation", Princeton University Press (1974). ISBN 978-0-7167-0344-0.
- S. Carroll, "Spacetime Geometry: An introduction to General Relativity", Pearson International New Edition (2013). ISBN 978-1-108-48839-6.
- V. Ferrari, L. Gualtieri, P. Pani, "General Relativity and its Applications: Black Holes, Compact Stars and Gravitational Waves", Taylor & Francis Group, LLC (2021). ISBN: 978-1-138-58977-3.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



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:	2
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.

Hay dos opciones de trabajo correspondientes a las dos plazas ofertadas

Opción 1: Estudiar las propiedades de estrellas de neutrones.

Opción 2: Estudiar las propiedades de agujeros negros u otros objetos compactos.

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.
3. V. Ferrari, L. Gualtieri, P. Pani, General Relativity and its Applications, CRC Press, 2021.
4. 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>).
6. 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 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Física y astrofísica de agujeros negros
Title:	Physics and astrophysics of black holes
Tutor/es:	Diego Rubiera García
E-mail tutor/es:	drubiera@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Aprender competencias matemáticas básicas en la física de agujeros negros

Entender la relevancia física de los diferentes aspectos teóricos de los agujeros negros

Enlazar conceptos teóricos con aspectos fenomenológicos y observacionales astrofísicos

Profundizar en algún aspecto matemático/teórico/fenomenológico de dicha física de agujeros negros

Establecer una primera toma de contacto con los métodos de trabajo modernos en el área

Metodología:

En una primera fase el alumno se expondrá a una serie de conceptos básicos en la física de agujeros negros, tales como las soluciones clásicas con masa, momento angular y carga, colapso gravitacional, radiación Hawking, singularidades espacio-temporales, leyes de la termodinámica, ergoesferas y extracción de energía, métodos computacionales, ondas gravitacionales, sombras, etc, usando para ello literatura propia del supervisor.

En una segunda fase el alumno escogerá un tema dentro de una amplia variedad para su profundización accediendo a literatura especializada el área, desarrollando un trabajo de profundización en él a la vez que se familiariza con los usos y costumbres de la investigación moderna a varios niveles.

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 2025-26



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 García
E-mail tutor/es:	drubiera@ucm.es
Número de plazas:	5
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Asimilar 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, proporcionándosele 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 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Agujeros negros en rotación
Title:	Rotating black holes
Tutor/es:	Francisco Navarro Lérída
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 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Fundamentos de la Gravedad Cuántica
Title:	Foundations of Quantum Gravity
Tutor/es:	Daniele Oriti
E-mail tutor/es:	doriti@ucm.es
Número de plazas:	3
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

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

Metodología:

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

Bibliografía:

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

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

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

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



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Términos de frontera en relatividad general
Title:	Boundary terms in general relativity
Tutor/es:	Fernando Ruiz Ruiz
E-mail tutor/es:	ferruiz@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Trabajo 1. Entender la importancia de los términos de frontera en la formulación de las ecuaciones de Einstein a partir de principios variacionales bien definidos para distintos tipos de condiciones de contorno.

Trabajo 2. Entender las ecuaciones de Einstein y sus simetrías en la frontera de un espacio-tiempo.

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 término de frontera de Gibbons-Hawking-York y el principio variacional, compactificación conforme y desarrollos asintóticos, y simetrías inducidas en la frontera.

Bibliografía:

G.W. Gibbons, S. Hawking: "Action integrals and partition functions in quantum gravity", Phys. Rev, D15 (1977) 2752 [<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.15.2752>].

J.W. York: "Role of Conformal Three-Geometry in the Dynamics of Gravitation", Phys. Rev. Lett. 28 (1972) 1082 [<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.1082>].

M. Bojowald: "Canonical gravity and applications", Cambridge University Press (Cambridge 2011).

A. Ashtekar, V. Petkov: "Springer Handbook of Spacetime", Springer (Heidelberg 2014) [<https://doi.org/10.1007/978-3-642-41992-8>].

S. de Haro. K. Skenderis, N. Solodukhin : "Holographic Reconstruction of Spacetime and Renormalization in the AdS/CFT Correspondence", Comm. Math., Phys. 217 (2001) 595 [<https://doi.org/10.1007/s002200100381>].