

Curso

2022-2023

# Guía Docente del Máster en Física Teórica



Facultad de Ciencias Físicas  
Universidad Complutense de Madrid

Versión 2.4 – 23/01/2023

APROBADA EN JUNTA DE FACULTAD EL 29 DE JUNIO DE 2022

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	3
1.1. Estructura general .....	3
1.2. Materias.....	3
1.3. Asignaturas.....	3
1.4 Complementos de Formación.....	4
1.5 Competencias.....	5
2. Fichas de las asignaturas .....	8
Teorías Gauge de las Interacciones Fundamentales .....	8
Fenomenología del Modelo Estándar.....	11
Campos y Cuerdas.....	15
Física de Astropartículas .....	18
Física Experimental de Partículas y Cosmología .....	22
Complementos de Análisis Matemático en Física .....	27
Complementos de Geometría y Teoría de Grupos en Física .....	30
Modelos Integrables en Física.....	33
Fenómenos Colectivos en Teoría de Campos .....	37
Sistemas Complejos.....	41
Relatividad General.....	44
Física del Modelo Cosmológico Estándar .....	48
Información Cuántica y Computación Cuántica.....	52
Simulación Cuántica.....	56
Trabajo Fin de Máster .....	61
3. Tabla de horarios.....	63
4. Calendario Académico .....	64
ANEXO. Enlaces de interés.....	66
Control de cambios.....	67

# 1. Introducción

## 1.1. Estructura general

El Máster en Física Teórica de la UCM tiene duración de un año y 60 créditos ECTS. Esta distribuido en 4 materias. El alumno deberá cursar 4 asignaturas obligatorias en el primer semestre, una por materia, y 4 optativas, en el segundo semestre, a elegir entre las que figuran en el Apartado 1.3 de esta Guía. Cada asignatura corresponde a 6 créditos ECTS. El Trabajo Fin de Máster es también obligatorio y corresponde a 12 créditos ECTS.

El Máster se basa en el crédito ECTS. Cada crédito ECTS se corresponde aproximadamente con 7.5 horas de lecciones y 20 horas de trabajo personal del alumno supervisado por el profesor. Debido a la necesidad de una constante interacción profesor-alumno, no se contempla la posibilidad de cursar el Máster sin acudir a las clases.

## 1.2. Materias

Las materias de las que se compone el Máster son:

- Interacciones Fundamentales
- Métodos Matemáticos y Estadísticos
- Cosmología y Relatividad General
- Información Cuántica

## 1.3. Asignaturas

En la tabla siguiente figuran las asignaturas por materia, los créditos y su carácter.

Materia	Asignatura	Carácter	Créditos
Interacciones Fundamentales	Teorías Gauge de las Interacciones Fundamentales	Obligatoria	6
	Fenomenología del Modelo Estándar	Optativa	6
	Campos y Cuerdas	Optativa	6
	Física de Astropartículas	Optativa	6
	Física Experimental de Partículas y Cosmología	Optativa	6
Métodos Matemáticos y Estadísticos	Complementos de Análisis Matemático en Física	Obligatoria	6
	Complementos de Geometría y Teoría de Grupos en Física	Optativa	6
	Modelos Integrables en Física	Optativa	6
	Fenómenos Colectivos en Teoría de Campos	Optativa	6
	Sistemas Complejos	Optativa	6
Cosmología y Relatividad General	Relatividad General	Obligatoria	6
	Física del Modelo Cosmológico Estándar	Optativa	6

Información Cuántica	Información Cuántica y Computación Cuántica	Obligatoria	6
	Simulación Cuántica	Optativa	6
Trabajo fin de Máster		Obligatoria	12

#### 1.4 Complementos de Formación

Con carácter excepcional, y sólo para aquellos alumnos que presenten alguna carencia específica en sus conocimientos de Física Teórica, se recomendará que cursen ciertos complementos formativos, según sugiera para cada alumno concreto la Comisión Coordinadora del Máster, a la vista de su historial académico. Dichos complementos formativos consistirán en asignaturas de tercer y cuarto curso del Grado en Física ofrecido por la Facultad de Físicas de la UCM. Para aquellos alumnos que hayan cursado grados de 240 créditos, el número de asignaturas recomendadas nunca será superior a cuatro. En concreto se podrá recomendar alguna de las siguientes asignaturas:

- Del tercer curso del Grado de Física de la UCM:
  - Mecánica Cuántica.
  - Geometría Diferencial y Cálculo Tensorial.
- Del cuarto curso del Grado de Física de la UCM:
  - Electrodinámica Clásica.
  - Cosmología.
  - Relatividad General y Gravitación.
  - Partículas Elementales.
  - Mecánica Teórica.
  - Campos Cuánticos.
  - Transiciones de Fase y Fenómenos Críticos.
  - Simetrías y Grupos en Física.

La elección concreta de las asignaturas que se sugerirá cursar a cada alumno deberá contar con el visto bueno de la Comisión Coordinadora del Máster, en función de los intereses científicos del alumno y la orientación (académica o de investigación) elegida. Los alumnos cursarán dichas asignaturas en las mismas condiciones que los alumnos de Grado, por lo que los contenidos, actividades formativas, sistemas de evaluación, etc. de estos complementos formativos serán los mismos que los de las correspondientes asignaturas de Grado. Si bien en términos generales será la Comisión Coordinadora del Máster la que sugiera los posibles complementos formativos en cada caso concreto, consideramos que los perfiles de ingreso esperados serán los siguientes:

a) Graduado o licenciado en Física con orientación de Física Aplicada: se recomendarán hasta cuatro de las siguientes asignaturas en función de los intereses del alumno: Campos Cuánticos, Geometría Diferencial y Cálculo Tensorial, Relatividad General y Gravitación, Simetrías y Grupos en Física, Partículas Elementales, Cosmología, Mecánica Teórica.

b) Graduados o licenciados en Matemáticas sin conocimientos en Mecánica Cuántica y Teorías de Campos: se recomendarán hasta cuatro de las siguientes asignaturas en función de los intereses del alumno: Mecánica Cuántica, Campos Cuánticos, Electrodinámica Clásica, Cosmología, Partículas Elementales, Transiciones de Fase y Fenómenos Críticos.

c) Ingenieros con conocimientos básicos de Física Teórica: se recomendarán hasta cuatro de las siguientes asignaturas en función de los intereses del alumno: Mecánica Cuántica, Campos Cuánticos, Cosmología, Partículas Elementales, Transiciones de Fase y Fenómenos Críticos, Simetrías y Grupos en Física, Relatividad General y Gravitación.

### 1.5 Competencias

El Máster está diseñado para proporcionar una base sólida para desarrollar estudios de doctorado en temas de investigación punteros, y dota al alumno de competencias en el uso de herramientas matemáticas y métodos avanzados de cálculo que son extremadamente útiles no solamente en Física Teórica sino en otros campos.

CB6 Poseer y comprender conocimientos que aporten una base u oportunidad de ser originales en el desarrollo y/o aplicación de ideas, a menudo en un contexto de investigación.

CB7 Que los estudiantes sepan aplicar los conocimientos adquiridos y su capacidad de resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios (o multidisciplinares) relacionados con su área de estudio.

CB8 Que los estudiantes sean capaces de integrar conocimientos y enfrentarse a la complejidad de formular juicios a partir de una información que, siendo incompleta o limitada, incluya reflexiones sobre las responsabilidades sociales y éticas vinculadas a la aplicación de sus conocimientos y juicios.

CB9 Que los estudiantes sepan comunicar sus conclusiones (y los conocimientos y razones últimas que las sustentan) a públicos especializados y no especializados de un modo claro y sin ambigüedades.

CB10 Que los estudiantes posean las habilidades de aprendizaje que les permitan continuar estudiando de un modo que habrá de ser en gran medida autodirigido o autónomo.

CG1 Adquirir conocimientos avanzados y demostrar, en un contexto de investigación científica altamente especializada, una comprensión detallada y fundamentada de los aspectos teóricos y prácticos y de la metodología de trabajo en Física Teórica.

CG2 Saber aplicar e integrar sus conocimientos, la comprensión de estos, su fundamentación científica y sus capacidades de resolución de problemas y de modelización en entornos nuevos y definidos de forma imprecisa, incluyendo contextos de carácter multidisciplinar altamente especializados en Física Teórica.

CG3 Saber evaluar y seleccionar la teoría física adecuada y la metodología precisa de la Física Teórica para formular juicios a partir de información incompleta o limitada incluyendo, cuando sea preciso y pertinente, una reflexión sobre la responsabilidad social o ética ligada a la solución que se proponga en cada caso.

CG4 Conocer y utilizar herramientas informáticas relativas al ámbito de estudio.

CG5 Localizar y gestionar la información relevante a un problema físico.

CG6 Integrar herramientas teóricas, datos experimentales y técnicas de simulación numérica.

CG7 Ser capaces de predecir y controlar la evolución de situaciones complejas mediante el desarrollo de nuevas e innovadoras metodologías de trabajo adaptadas al ámbito científico/investigador de la Física Teórica, experimental o en general multidisciplinar.

CG8 Saber transmitir de un modo claro y sin ambigüedades a un público especializado o no, resultados procedentes de la investigación científica y tecnológica o del ámbito de la innovación más avanzada, así como los fundamentos más relevantes sobre los que se sustentan.

CG9 Desarrollar la autonomía suficiente para participar en proyectos de investigación y colaboraciones científicas o tecnológicas dentro de la Física Teórica y la frontera experimental de la Física, en contextos interdisciplinares y, en su caso, con una alta componente de transferencia del conocimiento.

CG10 Localizar y analizar la bibliografía científica y especializada pertinente con el objeto de elaborar trabajos de investigación y desarrollar proyectos técnicos.

CG11 Ser capaz de organizar, comunicar y transmitir conocimientos de forma clara a la sociedad, tanto en ámbitos docentes como no docentes. Ilustrar y expresar la ciencia y sus aplicaciones, como parte fundamental de la cultura, integrando su vertiente ética.

CT1 Desarrollar un pensamiento y un razonamiento crítico, la capacidad de análisis y de síntesis y el pensamiento científico y sistémico.

CT2 Trabajar de forma autónoma y saber desarrollar estrategias de aprendizaje autónomo.

CT3 Gestionar el tiempo y los recursos disponibles. Trabajar de forma organizada.

CT4 Capacidad para prevenir y solucionar problemas, adaptándose a situaciones imprevistas y tomando decisiones propias.

CT5 Capacidad para trabajar en entornos complejos o inciertos y con recursos limitados.

CT6 Evaluar de forma crítica el trabajo realizado.

CT7 Capacidad para trabajar cooperativamente asumiendo y respetando el rol de los diversos miembros del equipo, así como los distintos niveles de dependencia del mismo.

CT8 Adaptarse a entornos multidisciplinarios e internacionales.

CT9 Comunicar eficientemente de forma oral y/o escrita conocimientos, resultados y habilidades, tanto en entornos profesionales como ante públicos no expertos.

CT10 Hacer un uso eficiente de las TIC en la comunicación y transmisión de ideas y resultados.

CE1 Conocer y comprender los elementos más relevantes de la Física Teórica actual. Profundizar en la comprensión de las teorías que se encuentran en la frontera de la Física, incluyendo su estructura matemática, su contrastación con resultados experimentales, y la descripción de los fenómenos físicos que dichas teorías explican.

CE2 Adquirir la capacidad de resolver problemas físicos avanzados, usando métodos tanto analíticos como numéricos. Comprender y dominar el uso de los métodos matemáticos utilizados en la Física Teórica. Desarrollar la capacidad de cálculo matemático avanzado.

CE3 Modelizar sistemas de alto grado de complejidad. Identificar variables y parámetros relevantes y realizar aproximaciones que simplifiquen el problema. Construir modelos físicos que describan y expliquen situaciones en ámbitos diversos.

CE4 Ser capaz de aplicar las herramientas informáticas adecuadas a la resolución de problemas propios de la Física Teórica. Utilizar y desarrollar sistemas de computación y programas para procesar la información, hacer simulaciones numéricas, análisis estadístico, presentar resultados, etc.

CE5 Evaluar los datos procedentes de experimentos en Física Fundamental, analizar sus resultados y compararlos con las previsiones de los modelos teóricos.

CE6 Elaborar proyectos innovadores de desarrollo tecnológico y/o de investigación. Ser capaz de diseñar, ejecutar y presentar públicamente el Trabajo de Fin de Master y de Introducción a la Investigación en temas situados en la frontera de la Física Teórica.



## 2. Fichas de las asignaturas



### MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Teorías Gauge de las Interacciones Fundamentales</b>			<b>Código</b>	606794
<b>Materia:</b>	Interacciones fundamentales	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Obligatorio	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	1º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4.2	1.8	
<b>Horas presenciales</b>	45	30	15	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Antonio Dobado González			<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	Despacho 231.0 (3ª planta) Depto. FT	<b>e-mail</b>	dobado@fis.ucm.es	

Teoría - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Aula 14	X	11:30-13:00	Antonio Dobado González	Primera parte	22,5	FT
	V	10:00-11:30	José Ramón Peláez Sagredo	Segunda parte	22,5	

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	Horarios	e-mail	Lugar
Antonio Dobado González	M, J: 12:00-15:00	dobado@fis.ucm.es	Despacho 03.231.0
José Ramón Peláez Sagredo	L, X: 15:30 a 18:30	jrpelaez@ucm.es	Despacho 02.319.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Entender la formulación Lagrangiana de las Teorías Gauge abelianas y no abelianas.
- Aplicar la integral de camino y la cuantización de Teorías Gauge y entender las Anomalías.
- Entender y aplicar la renormalización y la evolución de las constantes de acoplo.
- Entender el concepto e implementación de la ruptura espontánea de simetría.
- Conocer la formulación Lagrangiana de las interacciones fuerte y electrodébil.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG7, CG8, CG9, CG10, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT7, CT8, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5, CE6.

### Resumen

Simetrías gauge abelianas y no abelianas, lagrangianos invariantes gauge. Cuantización por integral de camino, método de Fadeev-Popov. Anomalías. Evolución de las constantes con la escala y grupo de renormalización. Realización de integrales de camino. Teoría cuántica de campos. Teorías gauge y su cuantización.

### Conocimientos previos necesarios

Mecánica Cuántica, Teoría Cuántica de Campos, Partículas Elementales

### Programa de la asignatura

#### 1. INTRODUCCIÓN

Introducción al Análisis Funcional. Teoría Cuántica de Campos. Matriz  $S$ , secciones eficaces y anchuras de desintegración. Fórmula de Reducción.

#### 2. INTEGRAL SOBRE CAMINOS

Integral de Camino en Mecánica Cuántica y en Teoría Cuántica de Campos. Teoría de perturbaciones y diagramas de Feynman.

#### 3. TEORÍAS GAUGE

Teorías gauge clásicas. Cuantización de Teorías gauge. Método de Fadeev-Popov. Teorías con ruptura espontánea de simetría. Mecanismo de Higgs.

#### 4. RENORMALIZACIÓN

Divergencias. Regularización. Renormalización. Grupo de Renormalización.

#### 5. EL MODELO ESTÁNDAR

Cromodinámica Cuántica. El Modelo GWS. La Estructura del Modelo Estándar.

<b>Bibliografía</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• M.E. Peskin, D.V. Schroeder, <i>An Introduction to Quantum Field Theory</i>. Addison Wesley 1995.</li> <li>• L. Álvarez-Gaumé, M. A. Vázquez-Mozo: <i>An Invitation to Quantum Field Theory</i> Springer Verlag. 2012.</li> <li>• T. P. Cheng, L.F. Li. <i>Gauge Theory of Elementary Particle Physics</i>, Clarendon Press (Oxford) 1984.</li> <li>• S. Pokorski, <i>Gauge Field Theories</i>, Cambridge University Press 1987.</li> <li>• D. Bailin, A. Love, <i>Introduction to Gauge Field Theory</i>. Cambridge University Press, 1987.</li> <li>• E. Leader, E. Predazzi. <i>An Introduction to Gauge Theories and Modern Particle Physics</i> vols 1,2. Cambridge University Press 1996.</li> <li>• F. J. Ynduráin, <i>Relativistic Quantum Mechanics and Introduction to Field Theory</i>, Springer Verlag 1996.</li> <li>• F. J. Ynduráin, <i>The Theory of quark and gluon interactions</i>, Springer-Verlag 1999.</li> <li>• S. Weinberg, <i>The Quantum Theory of Fields</i>, vols.I, II. Cambridge University Press 1994 1995.</li> <li>• P. Ramond, <i>Field Theory: A modern Primer</i>. Addison-Wesley Reading. 1990</li> <li>• A. Zee. <i>Quantum Field Theory in a Nutshell</i>. Princeton University Press. 2010.</li> <li>• H. Kleinert, <i>Path Integrals in Quantum Mechanics, Statistical and Polymer Physics and Financial Markets</i>. World Scientific. Singapore. 2004.</li> </ul>		
<b>Recursos en internet</b>		
<p>Campus virtual</p> <p>Notas/videos de clases de otros institutos de prestigio, por ejemplo: <a href="https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-324-relativistic-quantum-field-theory-ii-fall-2010/">https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-324-relativistic-quantum-field-theory-ii-fall-2010/</a></p>		
<b>Metodología</b>		
<p>Se impartirán clases, en la pizarra, en las que se explicarán y discutirán los diversos temas del programa. Los conceptos y técnicas introducidos en la explicación de los temas se ilustrarán con ejemplos y problemas que se resolverán en clase. Se estimulará la discusión, individual y en grupo, con los alumnos de todos los conceptos y técnicas introducidos en clase.</p>		
<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	60 %
Se realizará un examen (EX) a final de curso sobre el temario explicado en clase		
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	40 %
Se evaluarán problemas y ejercicios propuestos en clase y entregados por el alumno (PR).		
<b>Calificación final</b>		
Nota = 0.6 EX + 0.4 PR		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Fenomenología del Modelo Estándar</b>			<b>Código</b>	606795
<b>Materia:</b>	Interacciones Fundamentales	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1	<b>Semestre:</b>	2

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4.2	1.8	
<b>Horas presenciales</b>	45	30	15	

<b>Coordinador:</b>	Juan José Sanz Cillero			<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	Despacho 11, Planta 2, Ala Oeste. Depto. FT	<b>e-mail</b>	jusanz02@ucm.es	

Teoría/Prácticas - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	L V	13:00-14:30 9:30-11:00	I. Scimemi	A determinar	15	FT
			A. Gómez Nicola		15	FT
			J.J. Sanz Cillero		15	FT

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Ignazio Scimemi	M, X, J: 11:00 -12:00 (+ 3 horas online)	ignazios@ucm.es	Despacho 02.310.0
Angel Gómez Nicola	M y J: 15:00–18:00	gomez@ucm.es	Despacho 02.316.0
Juan Jose Sanz Cillero	<b>1er. Cuatrimestre</b> V: 12:30-15:30 presencial X: 12:30-15:30 online <b>2º Cuatrimestre</b> X: 12:30-14:30 presencial V: 11:00-12:00 presencial L: 12:00-13:00 online V: 13:30-15:30 online	jusanz02@ucm.es	Despacho 02.327.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Conocer la formulación Lagrangiana de las interacciones fuerte y electrodébil
- Entender la fenomenología de las interacciones electrodébiles. Bosones electrodébiles y ruptura de simetría.
- Entender la fenomenología de la cromodinámica cuántica: quarks y hadrones
- Ser capaz de realizar cálculos que describan los ejemplos más relevantes en sistemas físicos de interés en fenomenología de partículas.

### Competencias

CB6, CB7, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG5, CG8, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3.

### Resumen

- Conceptos básicos de Teorías de Campos para el Modelo Estándar.
- Teoría electrodébil y sus simetrías exactas y aproximadas. La ruptura espontánea de simetría electrodébil. Modelo de Glashow- Weinberg-Salam y el mecanismo de  $\begin{matrix} \uparrow \\ \text{Higgs} \\ \downarrow \\ \text{SEP} \end{matrix}$  Higgs. Violación de CP. Oscilaciones de neutrinos.
- Interacciones fuertes. Modelo Quark. Color. Libertad asintótica. Cromodinámica Cuántica. Simetría Quiral y Física Hadrónica. Confinamiento.
- Los límites fenomenológicos del modelo estándar y búsqueda de alternativas.

### Conocimientos previos necesarios

Mecánica Cuántica, Teoría Cuántica de Campos, Partículas Elementales

### Programa de la asignatura

#### 1. INTRODUCCIÓN

Repaso de Teoría de Perturbaciones, uso de Reglas de Feynman, Teorías gauge, matriz S y sus simetrías, secciones eficaces y desintegraciones. Procesos elementales en QED.

#### 2. INTERACCIONES FUERTES

- Funciones de Estructura de los hadrones: Dispersión elástica, reglas de suma. Dispersión inelástica. Scaling de Bjorken.
- Modelo Quark. Color y clasificación de hadrones. Quarks pesados.
- QCD: renormalización, libertad asintótica. Violación de scaling y ecuaciones DGLAP. Procesos de interés. El problema del confinamiento. Diagrama de fases.
- Ruptura espontánea de la Simetría Quiral. Teorema de Goldstone. Modelo sigma lineal.
- Física de Hadrones y teorías efectivas.

#### 3. INTERACCIONES ELECTRODÉBILES

Ruptura espontánea de Simetría. El modelo de Glashow-Weinberg-Salam. Bosones gauge

masivos y ruptura espontánea de simetría. El mecanismo de Higgs. Física del bosón de Higgs. Correcciones radiativas.

Fermiones en el Modelo Estándar. Matriz CKM. Violación de CP. Masas y oscilaciones de neutrinos. Matriz PMNS. Anomalías gauge y su cancelación en el Modelo Estándar.

### Bibliografía

1. F. Halzen, A.D. Martin, Quarks and Leptons, John Wiley and Sons 1984.
2. J.F. Donoghue, E. Golowich, B.R. Holstein, Dynamics of the Standard Model, Cambridge University Press 1994.
3. G. Kane. Modern Elementary Particle Physics, Addison-Wesley 1987.
- 4 B.R. Martin, G. Shaw, Particle Physics, John Wiley & Sons, 1992.
5. A. Dobado, A. Gómez Nicola, A.L. Maroto, J.R. Peláez, Effective Lagrangians for the Standard Model, Springer Verlag 1997.
6. W. Greiner, A.Shafer. Quantum Chromodynamics, Springer-Verlag 1994.
7. Fayyazuddin & Riazuddin, A Modern Introduction to Particle Physics, World Scientific, 2000.
8. D. Griffiths, Introduction to Elementary Particles, John Wiley & Sons, 1987.
9. The Review of Particle Physics. K. Nakamura et al. (Particle Data Group). J. Phys G37, 075021(2010)
10. P. Pascual, R. Tarrach, QCD for practitioners, Springer-Verlag, 1984
11. S. Pokorski, Gauge Field Theories, Cambridge monographs, 2001
12. C. Burgess, G. Moore, Standard Model (A primer), Cambridge University Press; Reprint editio (2012)
13. R. K. Ellis, W.J. Stirling, B.R. Webber, QCD and Collider Physics, Cambridge Monographs, 2003
14. F. J. Yndurain. The Theory of Quark and Gluon Interactions. Texts and Monographs in Physics. Springer (1999)
- 15 D. Bailin and A. Love Introduction to Gauge Field Theory Revised Edition, Taylor and Francis group (1993)

### Recursos en internet

PARTICLE DATA GROUP: <http://pdg.lbl.gov/>

### Metodología

Se impartirán clases, en la pizarra, en las que se explicarán y discutirán los diversos temas del programa. Los conceptos y técnicas introducidos en la explicación de los temas se ilustrarán con ejemplos y problemas que se resolverán en clase. Se estimulará la discusión, individual y en grupo, con los alumnos de todos los conceptos y técnicas introducidos en clase.

<b>Evaluación</b>		
<b>Examen</b>	<b>Peso:</b>	30 %
Se realizará un examen (E) con preguntas tipo test o breves		
<b>Asistencia a clase y realización de ejercicios entregables</b>	<b>Peso:</b>	40 %
Se evaluará la asistencia y los problemas y ejercicios (AEj) propuestos en clase y entregados por el alumno.		
<b>Trabajos individuales</b>	<b>Peso:</b>	30 %
Se realizará un trabajo (Tr) sobre un tema de la asignatura que el alumno deberá entregar al final del curso.		
<b>Calificación final</b>		
$0.4 \times AEj + 0.3 \times Tr + 0.3 \times E$		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Campos y Cuerdas</b>			<b>Código</b>	606796
<b>Materia:</b>	Interacciones Fundamentales	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4.2	1.8	
<b>Horas presenciales</b>	45	30	15	

<b>Profesor/a</b>	Carmelo Perez Martín			<b>Dpto:</b>	FT
<b>Coordinador/a:</b>	<b>Despacho:</b>	10 (3ºO)	<b>e-mail</b>	<a href="mailto:carmelop@fis.ucm.es">carmelop@fis.ucm.es</a>	

Teoría - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	M	11:30-13:00	Carmelo Perez Martín	Todo el curso	45	FT
	X	10:30-12:00				

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Carmelo Perez Martín	X, V: 11:00-14:00	<a href="mailto:carmelop@fis.ucm.es">carmelop@fis.ucm.es</a>	Despacho 03.316.0

Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entender la invariancia gauge y sus implicaciones sobre grados de libertad físicos y cuantización.</li> <li>▪ Comprender la formulación de una cuerda en un espacio-tiempo como una teoría de campos en dos dimensiones y sus simetrías. Comprender las herramientas básicas para su cuantización.</li> </ul>

Competencias
CB6, CB7, CB8, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CE1, CE2, CE3.

## Resumen

Parte I: La formulación mediante la integral de camino de teorías gauge cuánticas. El método BRS como mecanismo para controlar la invariancia gauge.

Parte II: La cuerda clásica, sus simetrías y grados de libertad físicos. Cuerdas en espacios-tiempo no planos. Cuantización en espacios-tiempo de Minkowski.

## Conocimientos previos necesarios

Los propios de la especialidad de Física fundamental (en algunas universidades llamada de Física Teórica) de la Licenciatura en Física o del Grado en Física. De manera específica, se necesitan conocimientos de Mecánica cuántica, Campos cuánticos, Partículas elementales y una base matemática en Cálculo, Álgebra y Geometría diferencial.

## Programa de la asignatura

### I. Cuantización de campos gauge.

#### Tema 1. Aspectos clásicos de los campos gauge.

El campo gauge, el tensor de fuerza y su interpretación geométrica como conexión y curvatura. Ecuaciones de movimiento. Breve discusión de sus soluciones.

#### Tema 2. La integral de camino para una teoría gauge.

El determinante de Faddeev-Popov y los campos fantasma. Reglas de Feynman.

#### Tema 3. Invariancia BRS y acción efectiva.

El operador BRS y su cohomología. La acción efectiva como generador de funciones de Green irreducibles y sus identidades. Renormalización y estructura de los contra-términos. Anomalías. Cálculo de la función beta a un loop.

### II. Introducción a las cuerdas.

#### Tema 4. Cuerda clásica en espacio-tiempo de Minkowski.

Acciones de Nambu-Goto y Polyakov. Invariancia bajo reparametrizaciones e invariancia Weyl. Ecuaciones de movimiento y condiciones de contorno (distinción entre cuerda abierta y cerrada). Ligaduras de Virasoro. Desarrollos en modos de Fourier.

#### Tema 5. Cuerda clásica en un espacio-tiempo con curvatura.

Acción de Polyakov para una cuerda en un espacio-tiempo con métrica no plana, 2-forma de Kalb-Rammond y dilatón. Ecuaciones de movimiento y condiciones de contorno. D-branas.

#### Tema 6. Cuantización de la cuerda en espacio-tiempo de Minkowski.

Cuantización canónica e identificación de los grados de libertad físicos en el gauge del cono de luz. Invariancia Lorentz y  $D=26$ . Comparación con métodos de cuantización covariantes sin fantasma (old covariant approach). Anomalía de Virasoro.

#### Tema 7. Introducción a los modelos de Wess-Zumino-Witten.

Acción clásica y ecuaciones de campo. Corrientes quirales. Ejemplos.

<b>Bibliografía</b>
<p>-C. Itzykson, J.-B. Zuber, Quantum Field Theory, Dover Publications Inc. (Mineola, NY 2006).                      - M. E. Peskin, D. V. Schroeder, An Introduction to Quantum Field Theory, Westview Press (Boulder, Co 1995).                      -M. B. Green, J. H. Schwarz, E. Witten, String theory, vol 1, Cambridge University Press (Cambridge 1987).                      -J. Polchinski, String theory, vol 1, Cambridge University Press (Cambridge 2000).</p>
<b>Recursos en internet</b>
<p>Campus virtual, Google drive, Google meet</p>
<b>Metodología</b>
<p>Se impartirán clases, en la pizarra, en las que se explicarán y discutirán los diversos temas del programa. Los conceptos y técnicas introducidos en la explicación de los temas se ilustrarán con ejemplos y problemas que se resolverán en clase. Se estimulará la discusión individual y en grupo con los alumnos de todos los conceptos y técnicas.</p>

<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	60 %
Un examen final consistente en problemas o/y cuestiones.		
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	40%
Entrega de problemas propuestos.		
<b>Calificación final</b>		
La media ponderada entre la nota obtenida en el examen y la obtenida en las otras actividades.		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Física de Astropartículas</b>			<b>Código</b>	606797
<b>Materia:</b>	Interacciones fundamentales	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4.5	1.5	
<b>Horas presenciales</b>	45	28	11	6

<b>Profesor/a</b>	Marcos López Moya			<b>Dpto:</b>	EMFTEL
<b>Coordinador/a:</b>	<b>Despacho:</b>	220, 3ª planta	<b>e-mail</b>	<a href="mailto:marcos@gae.ucm.es">marcos@gae.ucm.es</a>	

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/ Fechas	Horas	Dpto.
Aula 12	X	12:00 – 13:30	Jose Miguel Más Hesse	Febrero 2022	6	EMFTEL
	V	12:00 – 13:30	Marcos López Moya	Marzo 2022	7	EMFTEL
			Daniel Nieto Castaño	Abril 2022	15	EMFTEL

### Prácticas/Laboratorios - Detalle de horarios y profesorado

Grupo	Lugar	Sesiones	Profesor	Horas	Dpto.
A1	Laboratorio de Física Atómica	4 sesiones (X,V en las horas de teoría)	Marcos López Moya	3	EMFTEL
			Daniel Nieto Castaño	3	
	Aula de Informática 1 (4ª Planta)	3 sesiones (V en horario de clase)	Marcos López Moya	5	EMFTEL
	ESAC (Villafranca del Castillo)	1 sesión de 6h (fecha por determinar)	Jose Miguel Más Hesse	6	EMFTEL

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Daniel Nieto Castaño (*)	M, J: 11:30-13:00	<a href="mailto:d.nieto@ucm.es">d.nieto@ucm.es</a>	Despacho 03.257.0 3ª Planta-Pasillo Norte
Marcos López Moya	L, X: 14:00-17:00	<a href="mailto:marcos@gae.ucm.es">marcos@gae.ucm.es</a>	Despacho 03.220.0 3ª Planta-Módulo Central
Jose Miguel Más Hesse	Concertar con el profesor	<a href="mailto:mm@cab.inta-csic.es">mm@cab.inta-csic.es</a>	

(\*) (3h no presenciales): Horas de tutoría no presenciales a través de correo, campus virtual, etc., en días laborables.

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Comprender la fenomenología del modelo estándar de las interacciones fundamentales y el modelo estándar cosmológico.
- Entender los principales aceleradores cósmicos y la propagación de partículas en el Universo.
- Comprender las técnicas de detección en Física de (Astro)Partículas.
- Utilizar las técnicas de análisis, representación e interpretación de datos en Física de (Astro)Partículas.
- Conocer los principales problemas abiertos en Física de (Astro)Partículas y los experimentos que existen para abordarlos.
- Conocer el estado del arte en observaciones de interés cosmológico y las técnicas asociadas de tratamiento de datos

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5,CG6, CG8, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5.

### Resumen

Introducción a la Física de Astropartículas. Métodos de detección de rayos X, rayos gamma y partículas cósmicas de alta energía. Fuentes. Mecanismos de emisión y aceleración. Propagación. Perspectivas del campo.

### Conocimientos previos necesarios

Los correspondientes a las asignaturas troncales hasta el tercer curso, así como a las asignaturas obligatorias de tercer y cuarto curso del grado en Física en la especialidad de Física Fundamental.

### Programa de la asignatura

#### TEORÍA

- Astrofísica de rayos X  
Interacción de rayos X con la materia. Telescopios de rayos X. Astronomía estelar y galáctica de rayos X. Astronomía extragaláctica de Rayos X (Galaxias con Formación Estelar, Núcleos Activos de Galaxias, Cúmulos de Galaxias, GRBs)
- Astrofísica de Rayos Gamma  
Interacción de rayos gamma con la materia. Detectores de rayos gamma en tierra y en satélites. Fuentes y mecanismos de producción de rayos gamma.
- Física de Rayos Cósmicos  
Interacción de partículas cargadas con la materia. Detectores de rayos cósmicos en tierra y satélites. Mecanismos de producción y propagación de rayos cósmicos.
- Otras partículas de alta energía  
Producción y detección de neutrinos de alta energía. Búsqueda de Materia Oscura con

detectores de radiación de alta energía.

#### PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Medida del flujo de muones cósmicos con centelleadores plásticos empleando el método de coincidencias. Medida de la vida media del muón a partir de la detección de muones cósmicos. Espectroscopía de rayos gamma con detectores de germanio y centelleadores

#### PRÁCTICAS DE ORDENADOR

Utilización de software científico para el análisis de los datos tomados por detectores de rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos.

#### VISITA A ESAC

Visita a las instalaciones de la European Space Astronomy Centre (ESAC), que la ESA opera en Villafranca del Castillo, para conocer las actividades de investigación en los telescopios de rayos X y rayos gamma operados por la ESA.

### Bibliografía

#### Básica

- Katz, J.I., *High Energy Astrophysics*, Addison-Wesley, 1987
- M.S. Longair. *High Energy Astrophysics Vol 1 y 2*. Cambridge Univ. Press 1994.

#### Complementaria

- F. Aharonian. *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation*. World Scientific 2004
- C. Grupen, G. Cowan, et al: *Astroparticle Physics*. Springer 2005
- D. Perkins, *Particle Astrophysics*, Oxford University Press, 2009
- T. Stanev, *High energy cosmic rays*, Springer, 2010.

### Recursos en internet

Campus virtual con enlaces de interés para la asignatura.

### Metodología

Una parte fundamental de la asignatura vendrá en la forma de clases teóricas, con material de apoyo para los alumnos en el CV. Las clases se darán de manera habitual con el apoyo de medios audiovisuales modernos. Los conocimientos teóricos se complementan con la resolución de problemas.

Las prácticas de laboratorio tendrán lugar en el Laboratorio de Física Atómica, Nuclear y de Partículas, y las prácticas de ordenador se realizarán en el aula de Informática de la Facultad. En ambos tipos de prácticas, el alumno tendrá que entregar un informe con los resultados.

Por último, se realizará una visita a las instalaciones de la ESA en Villafranca del Castillo para conocer de cerca la actividad investigadora en Astrofísica de Rayos X y Rayos Gamma.

### Evaluación

#### Realización de exámenes

Peso:

30 %

El examen (Ex) tendrá una parte de cuestiones teórico-prácticas y otra parte de problemas (de nivel similar a los resueltos en clase). Para ambas partes el alumno podrá contar con libros de teoría de libre elección así como el material a su disposición en el CV.

#### Otras actividades de evaluación

Peso:

70 %

Otras actividades de evaluación (OA):

- Presentación, oral y por escrito, de trabajos
- Realización de prácticas de laboratorio y ordenador
- Evaluación continua mediante participación en clases, resolución de ejercicios y tests propuestos en clase, etc.

**Calificación final**

La calificación final será  $Cf = 0.3 \cdot Ex + 0.7 \cdot OA$



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Física Experimental de Partículas y Cosmología</b>		<b>Código</b>	606798	
<b>Materia:</b>	Interacciones Fundamentales	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4.5	1.5	
<b>Horas presenciales</b>	45	28	14	3

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Begoña de la Cruz Martínez	<b>Dpto:</b>	CIEMAT
	<b>Despacho:</b>	<b>e-mail</b>	Begona.delacruz@ciemat.es

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/ Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	L	11:30-13:00	Begoña de la Cruz	A determinar	3	CIEMAT
	M	13:00-14:30	Jesús Puerta		9	
			María Cepeda		8	
			Inés Gil		8	

### Prácticas - Detalle de horarios y profesorado

Grupo	Lugar	Sesiones	Profesor	Horas	Dpto.
A1	Aula CIEMAT	Práctica con Datos	Miguel Angel Velasco	7	CIEMAT
		Práctica con Datos	Jacobo Asorey	7	

### Laboratorios - Detalle de horarios y profesorado

Grupo	Lugar	Sesiones	Profesor	Horas	Dpto.
A1	CIEMAT	Fotodetección	Clara Cuesta Jose Ignacio Crespo	3	CIEMAT

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	Horarios	e-mail	Lugar
Todos	A convenir	aeciemaster@gmail.com	CIEMAT

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Comprender los resultados experimentales básicos en los que se basa el modelo estándar de las interacciones fundamentales y el modelo estándar cosmológico, a través de los datos de diversos experimentos punteros (LHC, DES, AMS,...) en laboratorios mundiales de referencia, y explicados por investigadores plenamente involucrados en ellos.
  - Comprender las técnicas experimentales (detección, análisis de datos, interpretación de resultados) en Física de Partículas, Astropartículas y Cosmología.
  - Conocer los principales problemas abiertos en Física de Partículas, Astropartículas y Cosmología y cómo se abordan en los experimentos actuales.
- Adquirir una metodología de trabajo necesaria para dedicarse a la investigación (realizar una tesis doctoral y posterior) en el ámbito mencionado.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG8, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5.

### Resumen

Fuentes de partículas (Aceleradores, fuentes de neutrinos, Cosmos), Detectores de Partículas. Técnicas de detección experimental en Física de Partículas y Cosmología, Técnicas de Análisis de Datos, Análisis Estadístico Datos, Interpretación de Resultados Físicos Experimentales. Paradigmas de Computación científica. SuperComputacion y Computacion de altas prestaciones. Modelo Estándar de Partículas e Interacciones: Bosones electrodébiles (W,Z,fotón), Estudios de quarks (c,b,top), Estudio del bosón de Higgs, Búsquedas de Nueva Física: nuevas resonancias, SUSY, Dimensiones Extra, partículas de vida media anormalmente altas, gravitón, otras componentes exóticas Astrofísica de partículas, en el espacio y terrestre. Rayos cósmicos cargados y gammas energéticos. Estudios de Neutrinos: oscilaciones, masas. Neutrinos estériles. Cosmología: Energía Oscura.

### Conocimientos previos necesarios

Mecánica Cuántica, Teoría Cuántica de Campos, Partículas Elementales

### Programa de la asignatura

#### 1. Introducción a la Física Experimental de Partículas.

- Breve descripción Modelo Estándar e Interacciones. Problemas del ME (p. ej. oscilaciones de neutrinos).
- Como abordar estos problemas. Motivación de Experimentos a grandes rasgos (objetivos, requisitos, precisiones, resoluciones, diseño, datos....) Objetivos de los experimentos actuales como LHC (CMS), experimentos de Neutrinos, de Cosmología, de Astropartículas.

#### 2. Técnicas Experimentales

- Breve repaso técnicas experimentales de detección partículas / observacionales.
- Fuentes de partículas: aceleradores, cosmos, fuentes de neutrinos.

- Técnicas instrumentales: Adquisición de datos (instrumentación electrónica), tratamiento de éstos (calibración, alineamiento).
- Paradigmas de Computación científica aplicado a Física de Partículas. Cantidades físicas medidas (posición, tiempo, energía, carga) y reconstrucción de magnitudes más elaboradas (momento, masas invariantes, etc).
- Funcionamiento y obtención datos y medidas de Tracker (TPC), detectores de Si, Calorímetros,
- Cámaras Deriva, RPCs, Detector Cerenkov, RICH,...
- Ejemplos transferencia de tecnología (aplicaciones física partículas a sociedad): PETs, aceleradores, Webs, GPS, materiales, laseres, superconductividad, vacío, criogenia...

### 3. Experimentos de Física de Partículas y Cosmología

Estudios de Física en varios aspectos del ME, usando las técnicas aprendidas hasta el momento.

- Descripción de fenomenología en colisiones pp a  $\sqrt{s} = 7, 8$  TeV
- Producción de bosones vectoriales de Interacción Débil (W, Z). Principales características y resultados.
- Estudios de producción de quarks, en general, jets y más en concreto producción de hadrones con quarks c y b y del quark top. Principales características y resultados.
- Estudio del Bosón de Higgs.
- Búsquedas de Nueva física: SUSY, Dimensiones Extra, nuevas resonancias, otros "exotismos"
- Física de neutrinos: situación actual, cuestiones sin resolver, resultados experimentales.
- Cosmología y estudio de Energía Oscura: situación actual, cuestiones sin resolver, resultados experimentales.

**Prácticas:** Fechas a determinar más adelante

- Sesión análisis de datos reales de experimento CMS, de colisiones pp a  $\sqrt{s} = 8$  TeV, estudio de bosones Z, W, Higgs.
- Detección de muones cósmicos con detectores mediante cámara de deriva/niebla.

Cada práctica lleva asociada la entrega de un informe por parte del alumno.

### Bibliografía

#### Básica:

- "Física Nuclear y de Partículas"  
Antonio Ferrer Soria  
Ed. UNIVERSITAT DE VALENCIA. SERVEI DE PUBLICACIONS 2007  
ISBN 9788437065687
- "Quarks & Leptons: An introductory course in Modern Particle Physics"  
F. Halzen, A. D: Martin  
Ed. Wiley  
ISBN-10: 0471887412, ISBN-13: 9780471887416
- "Particle Detectors"  
C. Grupen  
Ed. Cambridge University Press  
ISBN: 0521552168
- "Neutrino Physics",  
K. Zuber  
Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation, CRC Press, 2010
- "Extragalactic Astronomy and Cosmology"  
P.Schneider (2006)

Ed. Springer

- “STATISTICAL METHODS in EXPERIMENTAL PHYSICS”  
W.T. Eadie. D. Drijard. F.E. JAMES. B. Sadoulet, M. ROSS  
Ed. North-Holland, Amsterdam, 1971.

### **Complementaria**

- “Perspectives on LHC Physics”  
Varios autores. Editores :G. Kane & A. Pierce  
Ed. World Scientific  
ISBN: 9812779752
- “The Higgs hunter’s guide”  
J.F. Gunion, H.E. Haber, G. Kane & S. Dawson  
Ed. Perseus Publishing, Cambridge, Massachusetts  
ISBN: 073820305X
- “Phenomenology with massive neutrinos”  
M. C. Gonzalez-Garcia & M. Maltoni  
arXiv:0704.1800
- “Statistical Data Analysis”  
G. Cowan  
Ed. Oxford Science Publications  
ISBN: 0198501552
- “Gauge Theories in Particle Physics”  
I.J.R. Aitchison & A.J.G. Hey  
Ed. Adam Hilger  
ISBN: 0852743289
- “The Physics of Particle Detectors”  
D. Green  
Ed. Cambridge University Press  
ISBN: 0521662265
- “Statistics: A guide to the use of statistical methods in the physical sciences”  
R.J. Barlow  
Ed. John Wiley & Sons  
ISBN: 0471922951
- “Introduction to Elementary Particles”  
D. Griffiths  
Ed. Wiley-VCH  
ISBN: 9783527406012
- “Modern Cosmology”  
S.Dodelson (2003)  
Ed. Elsevier
- “Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics”  
C. Giunti & C. W. Kim,  
Ed. Oxford University Press, 2007
- "Neutrino cosmology",  
J. Lesgourgues, G. Mangano, G. Miele & S. Pastor  
Ed. Cambridge University Press, 2013.
- “Introduction to High Energy Physics”  
D.H. Perkins  
Ed. Cambridge University Press

<b>Recursos en internet</b>		
<p>Transparencias / prácticas en página Web. Enlaces de interés para la asignatura. Páginas Web de los diversos experimentos/Laboratorios</p>		
<b>Metodología</b>		
<p>Sesiones teóricas con medios audiovisuales (proyección transparencias). Sesiones prácticas (análisis de sucesos experimentales reales). Sesiones prácticas de laboratorio en el CIEMAT (Avda. Complutense 40, a 10 min de Facultad CC. Físicas) Presentaciones de trabajos/prácticas realizados por alumnos.</p>		
<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	0 %
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	100 %
<p>Para aprobar la asignatura será necesario presentar (y serán evaluados) los informes de las prácticas y ejercicios/problemas (PR) realizados a lo largo del curso, así como la asistencia regular al mismo. (65%) De manera adicional, se realizará un trabajo de profundización en la materia impartida, bien en relación con los datos experimentales provistos durante el curso, bien en algún tema estudiado (TR). Los trabajos serán presentados en clase (OP). (35%).</p>		
<b>Calificación final</b>		
<p>La calificación final será <math>N_{Final} = 0.65 N(PR) + 0.35 N(TR+OP)</math>, donde <math>N(PR)</math> y <math>N(TR+OP)</math> son (en una escala 0-10) las calificaciones obtenidas en los dos apartados anteriores.</p>		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Complementos de Análisis Matemático en Física</b>		<b>Código</b>	606799	
<b>Materia:</b>	Métodos Matemáticos y Estadísticos	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Obligatorio	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	1º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a</b>	Federico Finkel Morgenstern			<b>Dpto.:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	Ala oeste, 2ª planta, nº 20	<b>e-mail:</b>	<a href="mailto:ffinkel@ucm.es">ffinkel@ucm.es</a>	

Teoría - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Aula 14	X J	10:00-11:30 10:00-11:30	Federico Finkel Morgenstern	Todo el cuatrimestre	45	FT

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	Horarios	e-mail	Lugar
Federico Finkel Morgenstern	<b>1er. semestre:</b> L: 10:00 - 13:00 y 14:30-16:00 M: 10:00-11:30 <b>2º semestre:</b> X: 9:30-13:00 y 14:30 - 17:00	<a href="mailto:ffinkel@ucm.es">ffinkel@ucm.es</a>	Despacho 02.311.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

Adquirir las nociones básicas del Análisis Funcional y profundizar en el estudio de la variable compleja, aprendiendo diversos métodos avanzados para la resolución de ecuaciones diferenciales y el cálculo de desarrollos asintóticos.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG7, CG8, CG9, CG10, CG11,

CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT7, CT8, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5, CE6.

### Resumen

Teoría de la medida. Espacios funcionales. Espacios de Hilbert, bases ortonormales, operadores lineales, series y transformadas de Fourier, teoría de distribuciones, transformada de Fourier de distribuciones. Funciones de Green.

### Conocimientos previos necesarios

Álgebra lineal y cálculo en varias variables. Nociones básicas de ecuaciones diferenciales y variable compleja.

### Programa de la asignatura

- Integral de Lebesgue.
- Espacios topológicos, espacios métricos y espacios lineales normados
- Espacios de Hilbert. Geometría de los espacios de Hilbert.
- Bases ortonormales. Polinomios ortogonales. Series de Fourier.
- Operadores lineales en espacios de Hilbert. Teoría espectral.
- Espacios de distribuciones. Operaciones con distribuciones. Transformada de Fourier de distribuciones.

### Bibliografía

- N. Boccara. *Functional Analysis: An Introduction for Physicists*. Academic Press, New York, 1990.
- M. Reed and B. Simon, *Methods of Modern Mathematical Physics, vols. I, II*. Academic Press, New York, 1980.
- L. Abellanas y A. Galindo, *Espacios de Hilbert*, Eudema, 1987.
- V.S. Vladimirov, *Methods of the Theory of Generalized Functions (Analytical Methods and Special Functions)*, CRC Press, 2002.
- I. Stakgold, *Green's Functions and Boundary Value Problems*, Wiley, 2011.
- C.M. Bender, S.A. Orszag, *Advanced Mathematical methods for scientists and engineers*. Springer 1999.

### Recursos en internet

Campus virtual

### Metodología

Se desarrollarán las siguientes actividades formativas:

- Clases de teoría
- Resolución en clase de problemas propuestos durante el curso

Las lecciones de teoría y la resolución de problemas tendrán lugar fundamentalmente en la

pizarra, aunque podrán ser complementadas ocasionalmente con proyecciones con ordenador.  
El profesor recibirá individualmente a los alumnos en el horario especificado de tutorías, con objeto de resolver dudas, ampliar conceptos, etc.

<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	0 %
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	100 %
La evaluación se realizará mediante las siguientes actividades:		
<ul style="list-style-type: none"><li>• Entrega de problemas/trabajos propuestos (Calificación=Pp)</li><li>• Control(es) en clase sobre los problemas propuestos o similares (Calificación=Co)</li></ul>		
<b>Calificación final</b>		
La calificación final será un promedio de las actividades realizadas. $Cf = 0.6 Pp + 0.4 Co$		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Complementos de Geometría y Teoría de Grupos en Física</b>			<b>Código</b>	606800
<b>Materia:</b>	Métodos Matemáticos y Estadísticos	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Rafael Hernández Redondo			<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	22, tercera planta Oeste	<b>e-mail</b>	rafahern@ucm.es	

Teoría - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/ Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	L, J	10:00-11:30	Rafael Hernández Redondo	Todo el semestre	45	FT

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Rafael Hernández Redondo	M y X: 09:00-12:00	rafahern@ucm.es	Despacho 03.0308.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Aprender a utilizar diversos métodos avanzados de la geometría diferencial, la teoría de grupos de Lie y la teoría de representaciones, de interés para el estudio de la simetría en problemas físicos.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG8, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3.

### Resumen

Variedades diferenciables, conexiones, grupos y álgebras de Lie. Aplicaciones a la Física.

### Conocimientos previos necesarios

Se suponen conocimientos de ecuaciones diferenciales. Conocimientos recomendados: electrodinámica, teoría de campos, relatividad general y gravitación

### Programa de la asignatura

- Variedades diferenciables. Tensores. Cálculo exterior. Integración
- Grupos de transformaciones
- Conexiones
- Variedades (pseudo-)riemannianas
- Grupos y Álgebras de Lie
- Aplicaciones a la Física.

### Bibliografía

- Y. Choquet-Bruhat, C. DeWitt-Morette, M. Dillard-Bleick, *Analysis, manifolds and physics*, North Holland, 1991.
- R. L. Bishop, S. I. Goldberg, *Tensor Analysis on Manifolds*, Dover, New York, 1980..
- A. Mishchenko, A. Fomenko, *A Course of Differential Geometry and Topology*, Mir, Moscow, 1988.
- R. Abraham, J. E. Marsden, T. Ratiu, *Manifolds, Tensor Analysis, and Applications (second edition)*, Springer-Verlag, New York, 1988.
- D. Lovelock, H. Rund, *Tensors, Differential Forms and Variational Principles*, Dover, New York, 1989.
- S. Helgason, *Differential Geometry, Lie Groups and Symmetric Spaces*, AMS, Providence, 2001.
- S. Sternberg, *Lectures on Differential Geometry*, AMS Chelsea Publishing, 1999..
- S. Sternberg, *Lie algebras*, 2004.  
[http://www.math.harvard.edu/~shlomo/docs/lie\\_algebras.pdf](http://www.math.harvard.edu/~shlomo/docs/lie_algebras.pdf)
- D. H. Sattinger, O. L. Weaver, *Lie Groups and Algebras with Applications to Physics, Geometry, and Mechanics (third edition)*, University of Bangalore Press, New Delhi, 1997.
- K. Nomizu, *Lie Groups and Differential Geometry*, Mathematical Society of Japan, Tokyo, 1956.

### Recursos en internet

Campus virtual.

### Metodología

Se desarrollarán las siguientes actividades formativas:

- Clases de teoría
- Resolución en clase de problemas propuestos durante el curso

<ul style="list-style-type: none"> <li>Exposición de trabajos y/o problemas resueltos por los alumnos</li> </ul> <p>Las lecciones de teoría y la resolución de problemas tendrán lugar fundamentalmente en la pizarra, aunque podrán ser complementadas ocasionalmente con proyecciones con ordenador.</p> <p>El profesor recibirá individualmente a los alumnos en el horario especificado de tutorías, con objeto de resolver dudas, ampliar conceptos, etc.</p>		
<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	0%
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	100%
<p>Elaboración y presentación de un trabajo sobre temas relacionados con el programa desarrollado (Calificación=Tr).</p> <p>Entrega de problemas propuestos (Calificación=Pr).</p>		
<b>Calificación final</b>		
<p>La calificación final será <math>Cf = 0.7 Tr + 0.3 Pr</math></p>		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Modelos Integrables en Física</b>		<b>Código</b>	606801	
<b>Materia:</b>	Métodos Matemáticos y Estadísticos	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Manuel Mañas Baena		<b>Dpto:</b>	FT	
	<b>Despacho:</b>	10, 2ª O	<b>e-mail</b>	manuel.manas@ucm.es	

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	L	15:00 - 16:30	Manuel Mañas Baena	Segundo semestre	45	FT
	J	15:00 - 16:30				

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Manuel Mañas Baena	<b>1er. Cuatrimestre:</b> L: 10:30-13:30 (+ 3 horas online) <b>2º. Cuatrimestre:</b> M, X y V: 12:00 - 13:00 (+ 3 horas online)	<a href="mailto:manuel.manas@ucm.es">manuel.manas@ucm.es</a>	Despacho 02.318.0

(3 h no pr.): Horas de tutoría no presenciales a través de correo, campus virtual,...

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

Aprender las técnicas básicas para construir y analizar los modelos integrables y solubles más importantes en Física, y estudiar sus aplicaciones en otros campos.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG8, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3.

## Resumen

Se introducen técnicas básicas para el análisis de ecuaciones de onda (en derivadas parciales) no lineales. Se deducen las ecuaciones de Korteweg—de Vries, de Schrodinger no lineal NLS y las redes de Toda en diferentes contextos físicos. Se dan técnicas para su resolución como el método de *inverse scattering*. Finalmente, se presentan algunos resultados de integrabilidad de la mecánica clásica y la relación con la teoría de polinomios ortogonales.

## Conocimientos previos necesarios

Ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales, variable compleja, geometría diferencial.

## Programa de la asignatura

1. Introducción histórica:
  - a. Fermi—Pasta—Ulam y Zabusky—Kruskal
  - b. Scott Rusell
2. Ondas:
  - a. Transformada de Fourier. EDPs dispersivas
  - b. Energía y leyes de conservación. Características
  - c. Ondas de choque y condiciones de Rankine-Hugoniot
  - d. La cuerda vibrante
  - e. EDPs bien puestas
3. Técnicas asintóticas:
  - a. Método de la fase estacionaria y velocidad de grupo
  - b. La ecuación de Schrödinger libre
  - c. Velocidad de grupo y energía de la onda
  - d. Aplicación a KdV lineal
4. Método de las escalas múltiples:
  - a. Análisis perturbativo regular
  - b. Método de Poincaré—Stokes
  - c. Escalas múltiples
  - d. Pendulo simple
5. Ondas en aguas poco profundas
  - a. Ecuaciones de Navier—Stokes
    - i. Euler vs Lagrange. Tipos de fluidos
    - ii. Leray y el problema de Clay
  - b. Ecuaciones de Euler con frontera libre
    - i. Vorticidad. Fluidos irrotacionales
    - ii. Condiciones de frontera libre. Ondas lineales
  - c. Aguas someras y KdV
    - i. Ecuación de Boussinesq
    - ii. Escalas múltiples: KdV. KdV y dimensiones
    - iii. Tensión superficial. Ondas transversales y la ecuación de KP. Ondas solitarias
6. Elementos de la Teoría de sistemas integrables
  - a. Transformación de Miura. KdV y mKdV. Infinitas leyes de conservación
  - b. Invariancia Galileo. El papel de la ecuación de Schrödinger en KdV
  - c. Pares de Lax. AKNS y ecuaciones compatibles

7. El método del scattering inverso para KdV:
  - a. Funciones de onda y wronskianos. Fórmulas de conexión
  - b. Extensión holomorfa: Funciones de Green y Ecuaciones de Volterra
  - c. El problema inverso
  - d. Evolución temporal de los datos de scattering
  - e. Problema de Riemann—Hilbert y solitones de KdV
8. Polinomios ortogonales y sistemas integrables
  - a. Series de Fourier y polinomios de Chebichev
  - b. Recurrencia y teorema de Favard
  - c. Stieljes y Markov
  - d. Reticulo de Toda y polinomios ortogonales

### Bibliografía

#### Textos recomendados:

- Mark J Ablowitz, *Nonlinear Dispersive Waves, Asymptotic Analysis and Solitons* (Cambridge Texts in Applied Mathematics) Cambridge University Press (2011).
- Olivier Babelon, Denis Bernard y Michel Talon, *Introduction to Classical Integrable Systems* (Cambridge Monographs on Mathematical Physics) Cambridge University Press (2007).
- Maciej Dunajski, *Solitons, instantons, and twistors* (Oxford Graduate Texts in Mathematics) Oxford University Press (2010).
- Vladimir S. Gerdjikov, Gaetano Vilasi, Alexandar B. Yanovski, *Integrable Hamiltonian Hierarchies (Spectral and Geometric Methods)* (Lecture Notes in Physics **748**) Springer (2008)
- Alex Kasman, *Glimpses of Soliton Theory: The Algebra and Geometry of Nonlinear PDEs* (Student Mathematical Library **054**) American Mathematical Society (2010)
- R. S. Johnson. *A Modern Introduction to the Mathematical Theory of Water Waves*, Cambridge University Press 1997.

#### Clásicos:

- Mark J Ablowitz, y Peter, A. Clarkson, *Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering* (London Mathematical Society lecture note series **149**) Cambridge University Press (1991)
- Mark J Ablowitz y Harvey Segur, *Solitons and Inverse Scattering Transform* (SIAM Studies in Applied Mathematics **4**) Society for Industrial Mathematics (2000).
- Leonid A. Dickey, *Soliton equations and Hamiltonian systems* (2ed.) (Advanced Series in Mathematical Physics **26**), World Scientific, (2003).
- P. G. Drazin y R.S. Johnson, *Solitons: an introduction*, Cambridge University Press (1989).
- Ludwig D Faddeev y Leon A Takhtajan, *Hamiltonian methods in the theory of solitons* (Classics in Mathematics) Springer (2007).
- Riogo Hirota, *The direct method in soliton theory* (Cambridge Tracts in Mathematics **155**), Cambridge University Press (2004).
- Nigel J. Hitchin, Graeme B. Segal y Richard S Ward, *Integrable systems (twistors, loop groups and Riemann surfaces)* (Oxford Graduate Texts in Mathematics **4**) Oxford University Press (1999).
- Alan C. Newell, *Solitons in mathematics and physics* (CBMS-NSF Regional Congerence Series in Applied Mathematics **48**), Society for Industrial Mathematics (1985).
- Sergei P. Novikov, *Solitons and geometry* (Lezioni Fermiane), Cambridge University Press (1994).
- Sergei P. Novikov, Sergei V Manakov, L P. Pitevski y Volodia E. Zakharov, *Theory of Solitons (The inverse scattering theory)* (Monographs in Contemporary Physics) Springer.

#### Otros:

- Vladimir Belinski y Enric Verdaguer, *Gravitational Solitons* (Cambridge Monographs on Mathematical Physics) Cambridge University Press (2001).
- John Harnad (ed.) *Random Matrices, Random Processes and Integrable Systems* (CRM Series in Mathematical Physics), Springer-Verlag New York (2011).
- Nicolas Manton y Paul Sutcliffe, *Topological Solitons* (Cambridge Monographs on Mathematical Physics) Cambridge University Press (2004).
- Pol Vanhaecke, *Integrable Systems in the Realm of Algebraic Geometry* (Lecture Notes in Mathematics 1638) Springer (2001).

<b>Recursos en internet</b>		
Campus virtual		
<b>Metodología</b>		
<p>Se desarrollarán las siguientes actividades formativas: Clases de teoría Exposición de trabajos y/o problemas resueltos por los alumnos. Las lecciones de teoría se realizarán fundamentalmente usando la pizarra y proyecciones con ordenador. El profesor recibirá individualmente a los alumnos en el horario especificado de tutorías</p>		
<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	0 %
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	100 %
Realización de trabajos (50%). (Tr)		
Realización de problemas (50%). (Pr)		
<b>Calificación final</b>		
CF= 0.5* TR + 0.5*Pr		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Fenómenos Colectivos en Teoría de Campos</b>		<b>Código</b>	606802	
<b>Materia:</b>	Métodos Matemáticos y Estadísticos	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Aurélien Decelle		<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	5, 2ª O	<b>e-mail</b>	adecelle@ucm.es

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	X	9:00-10:30	Aurélien Decelle Beatriz Seoane Bartolomé	Primera parte Segunda parte	30	FT
	J	13:00-14:30			15	

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Aurélien Decelle (*)	L, M: 10:00-11:30	adecelle@ucm.es	Despacho 02.324.0
Beatriz Seoane Bartolomé (*)	L, X: 10:00-11:30	beseoane@ucm.es	Despacho 02.324.0

(\*) (+3h no presenciales): Horas de tutoría no presenciales a través de correo, campus virtual, etc.,

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Adquirir dominio suficiente de lenguajes de programación (C, Python, ...) para resolver problemas de cálculo numérico en Física, y aprender a evaluar de manera crítica los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas.
- Adquirir competencias básicas de simulación de Monte Carlo, análisis estadístico de datos y estimación de errores.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG7, CG10, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5

### Resumen

Propiedades emergentes en Mecánica Estadística a través de modelos simples exactamente solubles, cálculos perturbativos, como la teoría de campo medio, y métodos no perturbativos, como las simulaciones de Monte Carlo. Profundización en el estudio de fenómenos críticos y su descripción física. Introducción a la teoría estadística de campos. Introducción a la física de sistemas desordenados, fenomenología del comportamiento vítreo y a la ruptura de simetría de réplica. Aplicación de estas ideas a modelos de redes neuronales y machine learning.

### Conocimientos previos necesarios

Los propios de la especialidad de Física Fundamental (en particular Física Estadística y Transiciones de Fase, Mecánica Cuántica y Teoría de Campos).

### Programa de la asignatura

- Modelo de Ising y transiciones de fase
  - Introducción a la física estadística y al modelo de Ising
  - Modelo de Ising en cadenas 1D
  - Aproximación de campo medio. Curie-Weiss y modelo de Potts
  - Modelo esférico
- Teoría de Landau y teoría estadística de campos
  - Funciones de correlación
  - Teoría de Landau
  - Limitaciones de la aproximación del campo medio
  - Teoría de Landau-Ginzburg
  - Modos de Goldstone
  - Modelo gaussiano y teoría de perturbaciones
- Grupo de renormalización y scaling
  - Transformaciones de escala y ecuaciones de renormalización en el espacio de parámetros
  - Leyes de escala y exponentes críticos
  - Renormalización en el espacio de momentos. Expansión Epsilon.
- Métodos de Montecarlo
  - Cadenas de Markov Montecarlo
  - Tiempos de autocorrelación y análisis de datos
  - Escalado de tamaño infinito
- Modelos desordenados
  - Introducción a los modelos desordenados
  - Modelo de Sherrington-Kirkpatrick (SK)
  - Vuelta a la aproximación de campo medio
  - Problema de Ising inverso
  - Otros modelos: REM, modelo de Ising en campos aleatorios

- Redes neuronales y machine learning
  - Introducción al machine learning
  - Enfoque ML: Perceptrón, Hopfield y Máquina de Boltzmann Restringida (RBM)
  - Perceptrón: Capacidad y error de generalización
  - Modelo de Hopfield
  - RBM: dinámica de aprendizaje y diagrama de fase

<b>Bibliografía</b>
<p>Rodney J. Baxter, Exactly Solved Models in Statistical Mechanics, Academic Press Inc; New edition (28 enero 1989)</p> <p>G. Parisi, Statistical Field Theory. Perseus Books Group (1998).</p> <p>Michel Le Bellac, Quantum and Statistical Field Theory, Oxford Science Publications (1992)</p> <p>D.J. Amit &amp; V. Martín Mayor, Field Theory, the Renormalization Group and Critical Phenomena. World-Scientific Singapore, third edition (2005).</p> <p>Monte Carlo Methods in Statistical Mechanics: Foundations and New Algorithmics. A.D. Sokal (1996). <a href="http://www.stat.unc.edu/faculty/cji/Sokal.pdf">http://www.stat.unc.edu/faculty/cji/Sokal.pdf</a>.</p> <p>H. Nishimori, G. Ortiz: "Elements of Phase Transitions and Critical Phenomena"</p> <p>Mézard, Parisi, Virasoro : "Spin glass theory and beyond"</p> <p>Mézard, Montanari : "Information, physics and computation"</p>
<b>Recursos en internet</b>
Campus Virtual

<b>Metodología</b>
<p>Se impartirán clases en la pizarra, en las que se explicarán y discutirán los diversos temas del programa. Además, se distribuirán hojas de ejercicios analíticos o numéricos con aplicaciones sencillas de la teoría y se discutirán durante las horas de clase.</p> <p>Se dará una visión panorámica de los temas más avanzados, no sólo como formación general, sino también para facilitar que los estudiantes interesados puedan profundizar, por ejemplo, durante su trabajo de evaluación.</p>

<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	100 %
<p>Los profesores propondrán diversos artículos de investigación o temas a profundizar relacionados con la asignatura. Cada estudiante deberá elegir uno de estos trabajos, reproducir los cálculos analíticos o numéricos, y defender los resultados en una presentación (Pr) oral de 10-15 minutos seguida de 10 minutos de preguntas específicas.</p>		

Se valorará positivamente la participación en clase, la resolución de problemas de la asignatura durante las sesiones de ejercicios (Ej), o mediante entregables, durante el curso.

### Calificación final

La calificación final será =  $0.1 \cdot Ej + 0.9 \cdot Pr$



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Sistemas Complejos</b>			<b>Código</b>	606803
<b>Materia:</b>	Métodos Matemáticos y Estadísticos	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Chantal Valeriani			<b>Dpto:</b>	EMFTEL
	<b>Despacho:</b>	Despacho 119. Planta 1ª Este	<b>e-mail</b>	cvaleriani@ucm.es	

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/ Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	M	10:00-11:30	Chantal Valeriani	A determinar	10	EMFTEL
			Juan Manuel Parrondo		13	EMFTEL
	J	11:30 - 13:00	Nagi Khalil Rodríguez		6	Externo (URJC)
			Pablo Rodríguez López		6	Externo (URJC)
			Beatriz Seoane Bartolomé		10	FT

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Chantal Valeriani	M, X, J: 13:00-15:00	cvaleriani@ucm.es	Despacho 01.119.0 1ª planta-Módulo Este
Juan Manuel Parrondo	M: 11:30 – 13:30 y 15:30 – 16:30 J: 15:30 - 18:30	parrondo@ucm.es	Despacho 03.216.0 3ª Planta-Módulo Central
Nagi Khalil Rodríguez	Contactar con el profesor	nagi.khalil@urjc.es	URJC
Pablo Rodríguez López	Contactar con el profesor	pablo.ropez@urjc.es	URJC
Beatriz Seoane Bartolomé	L, X: 10:00-11:30 (+3 h tutorías no presenciales por correo electrónico)	beseoane@ucm.es	Despacho 02.324.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Conocer las propiedades y el comportamiento de sistemas complejos y ser capaz de plantear modelos teóricos que describan su dinámica en un ámbito interdisciplinar.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CE1, CE2, CE3.

### Resumen

Dinámica no lineal y sistemas caóticos, Sincronización, Modelización estocástica, Exponentes críticos, Transición vítrea, Materia activa, Estructura y Dinámica en Redes Complejas.

### Conocimientos previos necesarios

Física estadística, Mecánica clásica, Probabilidad, Ecuaciones diferenciales

Muy recomendable tener conocimientos de programación para cálculo científico.

### Programa de la asignatura

#### • MODELIZACIÓN ESTOCÁSTICA

Eventos aleatorios. Cadenas de Markov. Ecuación maestra. Ecuaciones diferenciales estocásticas: interpretación de Ito y de Stratonovich. Aplicaciones.

#### • REDES COMPLEJAS

Fundamentos: definiciones, métricas, modularidad, estructura a gran escala.  
Modelos de redes: grafos aleatorios, configuration model, modelos de crecimiento.  
Procesos dinámicos en redes: Percolación, robustez, propagación, sincronización.  
Aplicaciones: redes sociales, redes tecnológicas, redes biológicas, redes de información.

#### • TRANSICIONES DE FASE Y MATERIA ACTIVA

Transiciones de fase y exponentes críticos. El modelo de Ising. Simulaciones Monte-Carlo. Algoritmos de Monte Carlo avanzados. Transición vítrea.  
Materia activa: simulaciones y modelo de Vicsek, modelo run-and-tumble and modelo de Active Brownian particles. Física estadística de partículas auto-propulsadas.

### Bibliografía

- J.M. Yeomans, *Statistical Mechanics of Phase Transitions*, Oxford University Press, 1992.
- M. E. J. Newman, *Networks: An Introduction*, Oxford University Press, 2010.
- L. Landau and K. Binder, *A Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics*, Cambridge University Press, 2000
- W. Krauth, *Statistical Mechanics: Algorithms and Computations*, Oxford University Press (2006)
- L. Leuzzi, *Thermodynamics of the glassy state*, CRC press (2007)
- D.J. Amit and V. Martín Mayor, *Field Theory, the Renormalization Group and Critical Phenomena*. World-Scientific Singapore, third edition (2005)
- R. Toral y P. Colet, *Stochastic Numerical Methods: An Introduction for Students and*

*Scientists*, Wiley (2014)

### Recursos en internet

1. Grupo de Sistemas complejos URJC: <http://www.complexity.es/>
2. Grupo Interdisciplinar de Sistemas Complejos (GISC): <http://valbuena.fis.ucm.es/gisc/>
3. Skype/ Google Meet  
(para las reuniones semanales con los estudiantes, con el objetivo de seguir la evolución de su trabajo de evaluación continua)

### Metodología

El contenido teórico transmitido a través de clases magistrales en la pizarra y la lectura de textos especializados escogidos cubrirá los temas más fundamentales necesarios para una introducción a la teoría de sistemas complejos.

Cada profesor además expondrá una serie de modelos específicos más directamente relacionados con su investigación, y los estudiantes habrán de realizar un trabajo sobre alguno de los modelos propuestos.

Además de la asimilación de los contenidos teóricos, es fundamental para este curso que el estudiante adquiera competencias de programación necesarias para la simulación en el ordenador de los modelos estudiados. Parte de la docencia de la asignatura estará destinada a perfeccionar estas competencias.

### Evaluación

**Realización de exámenes**

**Peso:**

0 %

**Otras actividades de evaluación**

**Peso:**

100 %

Los estudiantes trabajarán por grupos en uno de los 7-8 temas de investigación propuestos. Los profesores tendrán contactos semanales con los estudiantes para seguir la evolución de sus trabajos. A final de curso, los estudiantes se evaluarán por medio de una presentación (Pr) en la cual cada uno expondrá su parte del trabajo a todos los demás. Después de cada presentación de unos 10 minutos, habrá 10 minutos de preguntas.

Se evaluarán trabajo/ejercicios propuestos en clase (Ej) y presentados por el alumno.

Se valorará positivamente la participación en clase en la sesión de ejercicios analíticos y numéricos.

### Calificación final

La calificación final será =  $0.1 \cdot Ej + 0.9 \cdot Pr$



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Relatividad General</b>			<b>Código</b>	606804
<b>Materia:</b>	Cosmología y relatividad general	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Obligatorio	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	1º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Luis Javier Garay Elizondo			<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	16, 2ªO	<b>e-mail</b>	luisj.garay@ucm.es	

Teoría - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Aula 14	M J	10:00-11:30 11:30-13:00	Luis Javier Garay Elizondo	Todo el cuatrimestre	45	FT

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Luis J. Garay Elizondo	<b>1er. semestre:</b> X: 9:00-12:00 J: 9:30-11:30 V: 12:30-13:30 <b>2º Cuatrimestre:</b> X: 9:30-15:30	luisj.garay@ucm.es	Despacho 02.315.0

Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Adquirir destrezas en las técnicas y conceptos geométricos para describir el espaciotiempo y</li> </ul>

la interacción gravitatoria.

- Compresión de fenómenos físicos característicos de la relatividad general como la emisión, propagación y recepción de ondas gravitatorias o los campos gravitatorios intensos de los agujeros negros.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG7, CG8, CG9, CG10, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT7, CT8, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5, CE6.

### Resumen

Relatividad general como una teoría geométrica de la interacción gravitatoria. Aspectos formales y físicos.

### Conocimientos previos necesarios

Electrodinámica, mecánica teórica, geometría diferencial, relatividad y cosmología, teoría cuántica de campos.

### Programa de la asignatura

- Geometría del espaciotiempo
- Campos y gravedad. Ecuaciones de Einstein. Estrellas relativistas
- Estructura global del espaciotiempo y singularidades
- Colapso gravitacional y agujeros negros.
- Uno o varios de los siguientes temas:
  - Campos cuánticos. Radiación de Hawking
  - Problema de condiciones iniciales y formulación 1+ 3.
  - Radiación gravitatoria

### Bibliografía

- S.M. Carroll, Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity, Addison-Wesley, 2003; Lecture notes on general relativity, <http://es.arxiv.org/abs/gr-qc/971201>.
- R.M. Wald, General Relativity, University of Chicago Press, 1984.
- S.W. Hawking y G.F.R. Ellis, The large scale structure of space-time (Cambridge University Press, 1973).
- C.W. Misner, K.S. Thorne y J.A. Wheeler, Gravitation, Freeman, 1973.
- J. Stewart, Advanced general relativity, Cambridge University Press, 1993.
- H. Stephani, D. Kramer, M. MacCallum, C. Hoenselaers y E. Herlt, Exact solutions to Einstein's field equations (Second Edition), Cambridge University Press, 2003.
- A.P. Lightman, W.H. Press, R.H. Price y S.A. Teukolsky, Problem book in relativity and gravitation, Princeton University Press, 1975.
- B.F. Schutz, A first course in general relativity, Cambridge University Press, 1985.
- E. Poisson, An advanced course in general relativity, <http://www.physics.uoguelph.ca/poisson/research/agr.pdf>.
- N. Straumann, General relativity with Applications to astrophysics, Springer-Verlag, 2004.

- J. Navarro-Salas, A. Fabbi, Modeling black hole evaporation, World Scientific, 2005.

### Recursos en internet

Campus virtual. Página web de la asignatura: <https://sites.google.com/site/luisigaray>

### Metodología

Se impartirán clases teóricas y prácticas en las que se explicarán y discutirán los diversos temas del programa. Los conceptos y técnicas introducidos en la explicación de los temas se ilustrarán con ejemplos y problemas que se resolverán en clase. Se estimulará la discusión, individual y en grupo, con los alumnos de todos los conceptos y técnicas introducidos en clase.

En las lecciones de teoría se usará la pizarra aunque podrán ser complementadas con proyecciones con ordenador.

Como actividades didácticas adicionales, se incluirá la entrega y corrección de ejercicios y, quizá, de trabajos.

Se suministrarán a los estudiantes enunciados de ejercicios con antelación a su resolución y discusión en la clase, que puede incluir la presentación de los mismos por parte de los estudiantes.

El profesor recibirá individualmente a los alumnos en el horario especificado de tutorías, con objeto de resolver dudas o ampliar conceptos.

### Evaluación

#### Realización de exámenes

Peso:

70 %

Examen final

#### Otras actividades de evaluación

Peso:

30 %

Problemas y ejercicios, que podrán ser resueltos en clase o evaluados mediante pruebas escritas.

### Calificación final

Si la nota del examen final es mayor que 3,5, la calificación final CF obtenida por el alumno se calculará aplicando la fórmula:  $CF = \max(E, 0,7 E + 0,3 A)$ , siendo E y A las notas de examen final y de otras actividades, respectivamente, ambas en la escala 0-10.





## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Física del Modelo Cosmológico Estándar</b>			<b>Código</b>	606805
<b>Materia:</b>	Cosmología y Relatividad General	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativa	<b>Curso:</b>	1	<b>Semestre:</b>	2

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Antonio López Maroto	<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b> 14, 3ª pl., oeste	<b>e-mail</b>	<a href="mailto:maroto@ucm.es">maroto@ucm.es</a>

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/ Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	X	16:00-17:30	Antonio López Maroto	Se alternarán a lo largo del semestre	15	FT
	V	13:30-15:00	José Alberto Ruiz Cembranos		30	FT

### Prácticas - Detalle de horarios y profesorado

Grupo	Lugar	Sesiones	Profesor	Horas	Dpto.
<b>A</b>	Laboratorio de Física Computacional	4 sesiones en horario de clase	José A. R. Cembranos	6	FT

(X no pr.): Horas de tutoría no presenciales a través de correo, campus virtual,.

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Antonio López Maroto	<b>1er. Cuatrimestre:</b> L: 10:30-13:30 (+ 3 horas online) <b>2º. Cuatrimestre:</b> M, X y V: 12:00 - 13:00 (+ 3 horas online)	<a href="mailto:maroto@ucm.es">maroto@ucm.es</a>	Despacho 03.313.0
José Alberto Ruiz Cembranos	M, J: 15:30 – 17:00 (+ 3 h online)	<a href="mailto:cembra@ucm.es">cembra@ucm.es</a>	Despacho 03.310.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

- Adquirir un conocimiento detallado del Modelo Cosmológico Estándar tanto desde el punto de vista observacional como teórico.
- Conocer los problemas fundamentales abiertos en Cosmología y las soluciones propuestas: teoría inflacionaria, modelos de materia oscura y de energía oscura
- Adquirir un conocimiento sólido de la teoría de perturbaciones cosmológicas, de los mecanismos de formación de estructuras y de las anisotropías del fondo cósmico de microondas.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG8, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5.

### Resumen

- Modelo cosmológico estándar
- Inflación
- Teoría de perturbaciones cosmológicas
- Formación de estructuras
- Fondo cósmico de microondas

### Conocimientos previos necesarios

Conocimientos previos de Cosmología, Relatividad General y Teoría Cuántica de Campos son muy recomendables para cursar la asignatura con aprovechamiento.

### Programa de la asignatura

#### Teoría

#### 1.- Modelo cosmológico estándar

**1.1 Bases observacionales.** Distribución de materia a gran escala. Ley de Hubble. Edad del universo. Abundancia de elementos ligeros. Radiación de fondo. Materia oscura. Expansión acelerada y energía oscura

**1.2 Bases teóricas.** Ecuaciones de Einstein. Métrica de Robertson-Walker. Medida de distancias. Modelos dominados por materia, radiación y constante cosmológica. Horizontes. Termodinámica y desacoplo de partículas. Recombinación y desacoplo materia-radiación. Reliquias cosmológicas: materia oscura fría y caliente. Abundancia de neutrinos y WIMPs

**2.- Problemas del modelo cosmológico estándar.** Planitud, horizontes y origen de la estructura a gran escala.

**3.- Inflación cosmológica.** Conceptos básicos. Modelos con un solo campo (inflatón): Lagrangiano, ecuaciones del movimiento, aproximación de slow-roll, condiciones iniciales, inflación caótica, inflación eterna. Evolución de las escalas durante inflación.

#### 4.- Teoría de perturbaciones cosmológicas

**4.1.- Teoría Newtoniana** para modos sub-Hubble: perturbaciones adiabáticas y de entropía. Ecuación de Mezsaros. Perturbaciones en fluidos multicomponente. Perturbaciones bariónicas.

**4.2.- Teoría relativista de las perturbaciones.** Clasificación (escalar, vector, tensor). Invariancia gauge. Potenciales de Bardeen. Elección de gauge. Evolución de las perturbaciones escalares en universos dominados por materia, radiación y campo escalar.

**4.3.- Evolución de las perturbaciones.** Plasma de bariones-radiación y materia oscura fría. Oscilaciones acústicas (BAO). Silk damping. Función de transferencia y función de crecimiento de las perturbaciones de materia oscura.

**5.- Generación de perturbaciones escalares durante inflación.** Cuantización canónica. Propiedades estadísticas de las perturbaciones gaussianas. Espectro de potencias. Índice espectral e invariancia de escala. Espectro de potencia de materia.

**6.- Generación de ondas gravitacionales durante inflación.** Cuantización. Espectro primordial. Condición de consistencia.

**7.- Anisotropías en el fondo cósmico de microondas.** Efectos Sachs-Wolfe, Doppler y Sachs-Wolfe integrado. Multipolos y escalas. Espectro de potencias angular: plateau de Sachs-Wolfe, picos acústicos, damping tail. Comparación con los resultados de Planck y estimación de parámetros cosmológicos.

#### Prácticas

Se pretende que los alumnos adquieran un conocimiento más cercano a la investigación real en el campo a la vez que se muestra el enlace entre diversos datos experimentales y los modelos teóricos actuales sobre el origen y evolución del Universo

Las prácticas consistirán en el uso de herramientas de cálculo simbólico dentro de la teoría de perturbaciones cosmológicas

Fechas: 29 mayo – 2 junio

Horario: por asignar

Lugar: Aula por asignar

#### Bibliografía

- V.F. Mukhanov, *Physical Foundations of Cosmology*, Cambridge, (2005).
- E.W. Kolb and M.S. Turner, *The Early Universe*, Addison-Wesley, (1990).
- S. Dodelson, *Modern Cosmology*, Academic Press (2003).
- A.R. Liddle and D.H. Lyth, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, Cambridge (2000).
- A.R. Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology*, Wiley (2003).
- T. Padmanabhan, *Theoretical Astrophysics, vols: I, II y III*, Cambridge (2000).
- S. Weinberg, *Cosmology*, Oxford (2008).
- R. Durrer, *The Cosmic Microwave Background*, Cambridge (2008).

#### Recursos en internet

Campus virtual

#### Metodología

- Clases de teoría y problemas.

<ul style="list-style-type: none"> <li>Se entregarán a los alumnos hojas con enunciados de problemas especialmente diseñadas para que el alumno vaya ejercitándose de manera gradual, y adquiriendo de forma secuencial las destrezas correspondientes a los contenidos y objetivos de la asignatura. Se contempla la realización de práctica con ordenador.</li> </ul>		
Evaluación		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	60%
El examen podrá consistir en la resolución de cuestiones teóricas y/o problemas (de nivel similar a los resueltos en clase) o en la presentación de un trabajo.		
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	40%
Realización de prácticas y ejercicios		
Calificación final		
La calificación final será la más alta de las siguientes dos opciones:		
<ul style="list-style-type: none"> <li><math>N_{Final} = 0.6N_{Ex} + 0.4N_{Otras}</math>, donde <math>N_{Ex}</math> y <math>N_{Otras}</math> son (en una escala 0 a 10) las calificaciones obtenidas en los dos apartados anteriores</li> <li>Nota del examen final</li> </ul>		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-2023)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Información Cuántica y Computación Cuántica</b>			<b>Código</b>	606806
<b>Materia:</b>	Información Cuántica	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Obligatorio	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	1ª

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a</b>	Miguel A. Martin-Delgado			<b>Dpto:</b>	FT
<b>Coordinador/a:</b>	<b>Despacho:</b>	8 FT, pl 3	<b>e-mail</b>	mardel@ucm.es	

### Teoría - Detalle de horarios y profesorado

Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/ Fechas	Horas	Dpto.
14	M,V	11:30-13:00	Miguel A. Martin-Delgado Ángel Rivas Vargas	Primera y Tercera parte Segunda parte	33,8 11,2	FT

### Tutorías - Detalle de horarios y profesorado

Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Miguel A. Martin-Delgado	M: 13:00-19:00	<a href="mailto:mardel@ucm.es">mardel@ucm.es</a>	Despacho 03.317.0
Ángel Rivas Vargas	L, J: 15:00 - 16:30 M: 16:30 - 19:30	<a href="mailto:anrivas@ucm.es">anrivas@ucm.es</a>	Despacho 03.312.0

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

Introducir al alumno a las nociones y métodos básicos de la Información y Computación Cuánticas, tales como:

- Puertas Lógicas y Circuitos Cuánticos.
- Algoritmos Cuánticos de cómputo: Grover, Shor etc.
- Comunicaciones Cuánticas. Protocolos.
- Criptografía Cuántica QKD. Teorema de No-Clonación Cuántica.
- Teleportación Cuántica. Codificación Densa en Canales Cuánticos.
- Destilación cuántica de entanglement.
- Computación Cuántica Tolerante a Fallos.
- Teorema del umbral de error cuántico.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG7, CG8, CG9, CG10, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT7, CT8, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5, CE6.

### Resumen

Se desarrollan los aspectos básicos de la Información Cuántica en sus dos vertientes principales: Computación Cuántica y Comunicaciones Cuánticas. Se introducen nociones de Información Clásica. Teoremas de Shannon en información clásica. Información cuántica. Computación cuántica. Criptografía y comunicaciones. Se evalúa el impacto de las tecnologías cuánticas. Principales plataformas de computación cuántica: IBM Quantum, Google etc. Algoritmos clásicos y cuánticos: paralelismos y diferencias. Errores cuánticos y su corrección. Sistemas con protección topológica. Estados entrelazados. No localidad y principio de indeterminación. Cuantificación del entanglement y sus medidas. Sistemas cuánticos abiertos.

### Conocimientos previos necesarios

Se recomiendan los contenidos adquiridos por el alumno que ha cursado las asignaturas de Física Cuántica I, II, Óptica, Electricidad y Magnetismo I,II y Mecánica Cuántica del grado de Físicas.

### Programa de la asignatura

1. Introducción al Formalismo de la Mecánica Cuántica
2. Teoría Clásica de la Información
  1. Primer Teorema de Shannon
  2. Segundo Teorema de Shannon
  3. Corrección Clásica de Errores
3. Puertas Lógicas y Circuitos Clásicos
4. Información Cuántica
  1. Del Bit al Qubit
  2. Puertas Lógicas y Circuitos Cuánticos
  3. Canales Cuánticos
5. Protocolos de Comunicación Cuánticos
  1. Teleportación
  2. Codificación Densa
  3. Criptografía Cuántica
6. Algoritmos Cuánticos
  1. Algoritmo de Grover
  2. Algoritmo de Shor
7. Medidas de cercanía entre estados cuánticos
  1. Entropía relativa.
  2. Distancia en traza.

3. Fidelidad y distancia de Bures.
4. Otras medidas de distancia.
8. Teoría de medidas generalizadas
  1. Repaso medidas proyectivas.
  2. Medidas generalizadas, POVM.
  3. Discriminación de estados cuánticos.
  4. Tomografía de estados.
9. Extensión de la teoría de operaciones cuánticas o canales
  1. Representaciones de canales cuánticos (Kraus, Stinespring, dinámicas reducidas, Choi-Jamiolkowski, vectorizaciones).
  2. Desigualdades canales-distancias (data processing-inequalities).
  3. Ruido clásico (random unitary channels) y ruido cuántico.
  4. Fidelidad de un canal.
  5. Tomografía de canales.
10. Medidas de entrelazamiento
  1. El paradigma "Operaciones locales y comunicación clásica"
  2. Requisitos de una medida de entrelazamiento.
  3. Estados puros: entropía de entrelazamiento.
  4. Medidas de entrelazamiento y Monotonías de entrelazamiento.
11. Computación Cuántica con Variables Continuas

### Bibliografía

Bouwmeester, D, Ekert, A, and Zeilinger, A (Eds.) *The physics of quantum information* Springer-Verlag 2000.

Galindo, A and Martin-Delgado, M.A., *Information and Computation: Classical and Quantum Aspects*. Rev. Mod. Phys. 74 (2002) 347-423.

Nielsen, M.A. and Chuang, I.L., *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press 2000.

Physics World, volumen de la revista Marzo 1998.

Kitaev, A. Yu., Shen, A. H. and Vyalii, M. N., *Classical and Quantum Computation*, American Mathematical Society, vol 47, 2002

M. Hayashi, *Quantum Information. An Introduction*, Springer-Verlag (2006)

M. M. Wilde, *Quantum Information Theory*, Cambridge University Press (2013),

J. Watrous, *The Theory of Quantum Information*, Cambridge University Press (2018)

<b>Recursos en Internet</b>
<p>Página web del curso: <a href="http://www.ucm.es/info/giccucm/">http://www.ucm.es/info/giccucm/</a></p>

<b>Metodología</b>
<p>A) Clases de teoría y problemas impartidas en la pizarra. Discusión con ejemplos, de los aspectos mas relevantes y del fomento de la participación activa del alumno.</p> <p>B) Se entregará a los alumnos material bibliográfico complementario para actualizar contenidos de una asignatura en continuo desarrollo y fomentar su interés por la investigación.</p> <p>C) Clases complementarias con presentaciones informáticas para ilustrar desarrollos experimentales recientes.</p> <p>D) Se estimulará la discusión, el trabajo en grupo y la participación en tutorías.</p> <p>E) Se contempla la invitación de investigadores de reconocido prestigio en temas de la asignatura para para impartir seminarios específicos sobre temáticas de actualidad.</p>

<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	30 %
<p>Examen final escrito (ver apartado de calificación final). El examen tendrá una parte de cuestiones teórico-prácticas y/u otra parte de problemas de nivel similar a los resueltos en clase.</p>		
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	70 %
<p>Las actividades de evaluación continua constarán de, a lo sumo, dos tipos de pruebas:</p> <p>1/ Entrega de ejercicios teóricos o prácticos cuya dificultad estará graduada en tres tipos: B (Baja), M (Media) y A (Alta).</p> <p>2/ Entrega de un mini-trabajo de investigación sobre algún tema de la asignatura que haya adquirido relevancia durante el curso. Sirve de orientación para el trabajo de master.</p>		
<b>Calificación final</b>		
<p>Las pruebas de la evaluación continua supondrán en su conjunto, una calificación C cuyo valor estará comprendido entre 0 y 10 puntos. La corrección del examen final, cuando exista, dará lugar a una calificación E cuyo valor estará comprendido entre 0 y 3 puntos.</p> <p>La calificación final N estará comprendida entre 0 y 10 puntos, y se obtendrá como el mayor de los dos siguientes números C y F, con:</p> <p><math>F = 0.7 C + E</math></p> <p>es decir la calificación final es <math>N = \max\{ C, F \}</math></p>		



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Simulación Cuántica</b>			<b>Código</b>	606807
<b>Materia:</b>	Información Cuántica	<b>Módulo:</b>	Temas de Física Teórica		
<b>Carácter:</b>	Optativo	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	6	4	2	0
<b>Horas presenciales</b>	45	28	17	0

<b>Profesor/a Coordinador/a:</b>	Ángel Rivas Vargas			<b>Dpto:</b>	FT
	<b>Despacho:</b>	15 FT, pl 3	<b>e-mail</b>	<a href="mailto:anrivas@ucm.es">anrivas@ucm.es</a>	

Teoría - Detalle de horarios y profesorado						
Aula	Día	Horario	Profesor	Periodo/Fechas	Horas	Dpto.
Seminario 3.2	M	15:00-16:30	Luis Lorenzo Sánchez Soto	Primera Parte	15	Óptica
	X	13:30-15:00	Angel Rivas Vargas	Segunda Parte	30	FT

Tutorías - Detalle de horarios y profesorado			
Profesor	horarios	e-mail	Lugar
Luis Lorenzo Sánchez Soto	L: 10:30 – 12:30 J, V: 12:30 – 14:30	lsanchez@ucm.es	Despacho 01.304.0
Angel Rivas Vargas	L, J: 15:00 - 16:30 M: 16:30 – 19:30	anrivas@ucm.es	Despacho 03.312.0

Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Introducir al alumno en la descripción de sistemas de óptica cuántica y física atómica con aplicaciones en la investigación de modelos de física de la materia condensada y en el estudio de estados y fenómenos no clásicos de luz.</li> <li>Comprensión de los métodos de preparación y manipulación de estados cuánticos: ingeniería de Hamiltonianos, medidas de estados cuánticos y control de interacciones.</li> <li>Introducción a la teoría de los sistemas de muchos cuerpos que aparecen en sistemas de física atómica: cristales artificiales y sistemas magnéticos efectivos.</li> <li>Cuantificación de la complejidad de un sistema cuántico y aplicaciones en física de materiales y simulación cuántica con sistemas atómicos.</li> <li>El alumno estará en disposición de entender los avances en el campo de la simulación</li> </ul>

cuántica, comenzar trabajos de investigación en este campo y entender su impacto y aplicaciones tecnológicas potenciales.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CE1, CE2, CE3.

### Resumen

La simulación y el control de sistemas cuánticos persigue llevar a cabo medidas y procesos cuánticos sofisticados, a fin de estudiar propiedades complejas de la materia, así como desarrollar aplicaciones que requieren un alto grado de dominio sobre la dinámica cuántica. En la asignatura se explicará cómo controlar diversos tipos de sistemas basados en óptica cuántica, física atómica y materia condensada. Así como su uso para reproducir en el laboratorio modelos avanzados de física teórica cuya solución se desconoce, realizar algoritmos en un ordenador cuántico o implementar medidas con un alto grado de precisión. Para ello se proporcionarán al alumno todas las herramientas teóricas necesarias, tanto para la comprensión de los sistemas físicos involucrados (átomos, iones, circuitos superconductores) como para la descripción de su dinámica bajo condiciones de control (hamiltonianos efectivos, teoría de perturbaciones, sistemas cuánticos abiertos, etc.). La asignatura proporciona una visión complementaria a la asignatura de "Información Cuántica y Computación Cuántica", con un gran énfasis en la implementación física y los últimos desarrollos experimentales.

### Programa de la asignatura

#### 1 – Introducción: física de sistemas cuánticos controlados y simulación cuántica

- **El desafío de mantener controlado un sistema cuántico.**
  - Sistemas de iones atrapados, redes ópticas de átomos, dispositivos superconductores.
- **Utilidad de los sistemas cuánticos controlados.**
  - Información y computación cuántica.
  - Sistemas cuánticos de muchos cuerpos: simulación cuántica digital y analógica. Ingeniería cuántica de materiales.
  - Metrología cuántica.
  - Problemas fundamentales en física cuántica.

#### 2 – Principios de óptica cuántica aplicados a la simulación y el control de sistemas cuánticos

- Interacción luz-materia.
- Eliminación adiabática de grados de libertad: hamiltonianos efectivos.
- Efectos mecánicos de la interacción luz-materia: potenciales y fuerzas ópticas, principios de atrapamiento de átomos.
- Enfriamiento láser.
- Preparación y medición de estados cuánticos por medios ópticos.

### 3 – Sistemas cuánticos abiertos

- El problema del aislamiento de un sistema cuántico.
- Modelos sistema-baño.
- Ecuaciones maestras. Aproximación Born-Markov-Secular.
- Decaimiento y decoherencia.

### 4 – Metrología cuántica

- Uso de sistemas cuánticos como sensores.
- Teoría de cuántica de la estimación. Entrelazamiento y límite de Heisenberg.
- Aplicaciones: espectrometría de alta resolución, relojes atómicos, detección de ondas gravitacionales y otros efectos relativistas.

### 5 - El futuro de la simulación y el control cuántico

- Estados cuánticos exóticos.
- Órdenes topológicos. Modelo de Kitaev.
- Otras aplicaciones fundamentales y tecnológicas.

#### Conocimientos previos necesarios

Aunque la asignatura es auto-contenida, se recomiendan los contenidos adquiridos por el alumno que ha cursado las asignaturas de Física Cuántica I, II, Óptica, Electromagnetismo I, II, y Mecánica Cuántica del grado de Físicas.

#### Bibliografía

1. R. P. Feynman, *Simulating physics with computers*, Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982).
2. C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc, y Gilbert Grynberg, *Atom-photon interactions: basic processes and applications*, Wiley-Interscience (1992).
3. P. K. Ghosh, *Ion Traps*, Oxford University Press (1995).
4. S. Lloyd, *Universal Quantum Simulators*, Science 273, 1073 (1996).
5. M. O. Scully y M. S. Zubairy, *Quantum Optics*, Cambridge University Press (2001).
6. H.-P. Breuer y F. Petruccione, *The theory of open quantum systems*, Oxford University Press (2002).
7. D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, *Quantum dynamics of single trapped ions*, Rev. Mod. Phys. 75, 281 (2003)
8. A. Rivas y S. F. Huelga, *Open Quantum Systems. An introduction*, Springer 2012 [También en <https://arxiv.org/abs/1104.5242>].

<p>9. M. Lewenstein, A. Sanpera, y V. Ahufinger, <i>Ultracold Atoms in Optical Lattices: Simulating quantum many-body systems</i>, Oxford University Press (2012).</p> <p>10. <i>Nature Physics Insight: Quantum Simulation</i>, Nature Physics 8, 263–299 (2012).</p> <p>11. S. Haroche y J. -M- Raimond, <i>Exploring the Quantum</i>, Oxford University Press (2014).</p> <p>12. I. M. Georgescu, S. Ashhab, y Franco Nori, <i>Quantum Simulation</i>, Rev. Mod. Phys. 86, 153 (2014).</p> <p>13. S. Haroche y J. -M- Raimond, <i>Exploring the Quantum</i>, Oxford University Press (2014).</p> <p>14. A. Blais, A. L. Grimsmo, S. M. Girvin, y A. Wallraff, <i>Circuit Quantum Electrodynamics</i>, Rev. Mod. Phys. 93, 025005 (2021)</p>
<b>Recursos de Internet</b>
Campus virtual

<b>Metodología</b>
<p>A) Clases de teoría y problemas impartidas en la pizarra. Discusión con ejemplos, de los aspectos más relevantes y del fomento de la participación activa del alumno.</p> <p>B) Se entregará a los alumnos material bibliográfico complementario para actualizar contenidos de una asignatura en continuo desarrollo y fomentar su interés por la investigación.</p> <p>C) Clases complementarias con presentaciones informáticas para ilustrar desarrollos experimentales recientes.</p> <p>D) Se estimulará la discusión, el trabajo en grupo y la participación en tutorías.</p> <p>E) Se contempla la invitación de investigadores de reconocido prestigio en temas de la asignatura para para impartir seminarios específicos sobre temáticas de actualidad.</p>

<b>Evaluación</b>		
<b>Realización de exámenes</b>	<b>Peso:</b>	30 %
Examen final escrito (ver apartado de Calificación Final). El examen tendrá una parte de cuestiones teórico-prácticas y/u otra parte de problemas de nivel similar a los resueltos en clase.		
<b>Otras actividades de evaluación</b>	<b>Peso:</b>	70 %
<p>Las actividades de evaluación continua constarán de, a lo sumo, dos tipos de pruebas:</p> <p>1/ Entrega de ejercicios teóricos o prácticos cuya dificultad estará graduada en tres tipos: B (Baja), M (Media) y A (Alta).</p> <p>2/ Entrega de un mini-trabajo de investigación sobre algún tema de la asignatura que haya adquirido relevancia durante el curso. Sirve de orientación para el trabajo de master.</p>		
<b>Calificación final</b>		
Las pruebas de la evaluación continua supondrán en su conjunto, una calificación C cuyo valor estará comprendido entre 0 y 10 puntos. La corrección del examen final, cuando exista, dará		

lugar a una calificación E cuyo valor estará comprendido entre 0 y 3 puntos.

La calificación final N estará comprendida entre 0 y 10 puntos, y se obtendrá como el mayor de los dos siguientes números C y F, con:

$$F = 0.7 C + E$$

es decir la calificación final es  $N = \max\{ C, F \}$



## MÁSTER EN FÍSICA TEÓRICA (curso 2022-23)

<b>Ficha de la asignatura:</b>	<b>Trabajo Fin de Máster</b>			<b>Código</b>	606793
<b>Materia:</b>	Trabajo Fin de Máster	<b>Módulo:</b>	Trabajo Fin de Máster		
<b>Carácter:</b>	Optativa	<b>Curso:</b>	1º	<b>Semestre:</b>	1º y 2º

	Total	Teóricos Seminarios	Práct	Lab.
<b>Créditos ECTS:</b>	12			
<b>Horas presenciales</b>				

<b>Profesor/a</b>	Ángel Rivas Vargas			<b>Dpto:</b>	FT
<b>Coordinador/a:</b>	<b>Despacho:</b>	6	<b>e-mail</b>	anrivas@ucm.es	

### Resultados del aprendizaje (según Documento de Verificación de la Titulación)

Como resultado de la realización del Trabajo de Fin de Máster el alumno habrá aprendido, en primer lugar a evaluar el estado de desarrollo de un problema dentro del marco de la Física Teórica actual, buscando referencias en forma de artículos de divulgación, libros de texto, artículos de revisión (reviews) e incluso artículos de investigación. Así mismo, habrá aprendido a aplicar metodologías, técnicas y competencias propias Física Teórica, desarrolladas en las distintas materias necesarias para resolver un problema concreto en el ámbito específico del Máster. En concreto, se espera del alumno que adquiera las competencias explicadas en el apartado correspondiente y muy en particular que haya sido capaz de:

Estudiar en profundidad, analizar y desarrollar un tema concreto basándose en los contenidos y el nivel de las materias del Máster.

Mostrar capacidad para aplicar las habilidades y competencias adquiridas durante los estudios del Máster a situaciones concretas y nuevas.

Presentar un Proyecto, que puede incluir un componente de introducción a la investigación, haciendo una defensa oral del mismo.

### Competencias

CB6, CB7, CB8, CB9, CB10, CG1, CG2, CG3, CG4, CG5, CG6, CG7, CG8, CG9, CG10, CG11, CT1, CT2, CT3, CT4, CT5, CT6, CT8, CT9, CT10, CE1, CE2, CE3, CE4, CE5, CE6.

### Resumen

Esta materia pretende el desarrollo por parte del alumno de un trabajo original de revisión o de investigación en el ámbito del programa del Máster de Física Teórica. Los TFM deberán

tener un perfil académico o investigador, realizándose en el ámbito de la Universidad o centros de investigación relacionados con el máster o al menos autorizados por la Comisión Coordinadora del Máster. Los TFM deberán presentarse por escrito y posteriormente defenderse públicamente en las fechas que se establezcan para cada una de las dos convocatorias existentes en cada curso académico.

### Programa de la asignatura

El alumno desarrollará de manera individual alguno de los temas ofertados por los profesores que participen en el máster, que se encargarán de su seguimiento y supervisión. Los trabajos elegidos por los alumnos que tengan una orientación académica consistirán en una revisión en profundidad de teorías o modelos ya existentes. En cambio, los trabajos que lleven a cabo alumnos que elijan la orientación investigadora deberán incorporar algún contenido original de modo que el trabajo pueda servir como iniciación de una actividad investigadora futura. Los temas sobre los que versarán trabajos de investigación se corresponderán con las líneas de investigación de los profesores del Máster y la comunidad de investigadores de todas las instituciones colaboradoras. Deberán contener algún aspecto novedoso y potencialmente podrían ser el punto de partida de futuras tesis doctorales en los casos que así resultara posible.

### Metodología

Trabajo de Fin de Máster. Para la realización del Trabajo de Fin de Máster de 12 ECTS, el alumno desarrollará de manera individual algunos de los temas ofertados por profesores que participan en el máster, que se encargarán de su seguimiento y supervisión. Los trabajos realizados por los alumnos que elijan la orientación académica tendrán un enfoque orientado a la revisión en profundidad de teorías o modelos ya existentes. En cambio, los trabajos que lleven a cabo los alumnos que elijan la orientación investigadora tendrán que incorporar algún contenido original, de modo que el trabajo pueda servir como iniciación a una carrera investigadora.

### Evaluación

Realización de exámenes	Peso:	
Otras actividades de evaluación	Peso:	100%
Realización y presentación del Trabajo Fin de Máster (Tr)		
Calificación final		
Cf = Tr		

### 3. Tabla de horarios.

#### PRIMER SEMESTRE

	L	M	X	J	V
10:00		Relatividad General	Complementos de Análisis Matemático en Física	Complementos de Análisis Matemático en Física	Teorías Gauge de las Interacciones Fundamentales
10:30					
11:00					
11:30		Información Cuántica y Computación cuántica	Teorías Gauge de las Interacciones Fundamentales	Relatividad General	Información Cuántica y Computación cuántica
12:00					
12:30					

#### SEGUNDO SEMESTRE

	L	M	X	J	V
9:00			Fenómenos Colectivos en Teoría de Campos		
9:30					Fenomenología Modelo Estandar
10:00	Complementos de Geometría y Teoría de Grupos	Sistemas Complejos	Campos y Cuerdas	Complementos de Geometría y Teoría de Grupos	
10:30					
11:00					
11:30	Física Exp. de Partículas y Cosmología	Campos y Cuerdas	Física de Astroparticulas	Sistemas Complejos	Física de Astroparticulas
12:00					
12:30					
13:00	Fenomenología Modelo Estandar	Física Exp. de Partículas y Cosmología	Simulación Cuántica	Fenómenos Colectivos en Teoría de Campos	Física del Modelo Cosmológico
13:30					
14:00					
14:30					
15:00	Modelos Integrables en Física	Simulación Cuántica	Física del Modelo Cosmológico	Modelos Integrables en Física	
15:30					
16:00					
16:30					
17:00					
17:30					

## 4. Calendario Académico

5. Periodos de clases y exámenes	
Clases Primer Semestre:	Del 5 de septiembre al 16 de diciembre de 2022
Exámenes Primer Semestre (diciembre-enero):	Del 19 al 21 de diciembre de 2022 y del 9 al 20 de enero de 2023
Entrega de Actas	6 de febrero de 2023
Clases Segundo Semestre:	Del 23 de enero al 30 de marzo de 2023 y del 11 de abril al 10 de mayo de 2023
Exámenes Segundo Semestre (mayo):	del 11 al 31 de mayo de 2023
Entrega de Actas	16 de junio de 2023
Exámenes Convocatoria Extraordinaria (junio)	del 12 al 30 de junio de 2023
Entrega de Actas	14 de julio de 2023

*Nótese que cada ficha indica el número de horas de que consta la asignatura, por lo que en algunas el final de las clases podría ser anterior al final del periodo lectivo.*

Festividades y días no lectivos	
12 de octubre	Fiesta Nacional
31 de octubre	No lectivo
1 de noviembre	Festividad de Todos los Santos
9 de noviembre	Madrid, festividad de La Almudena
14 de noviembre	San Alberto Magno, trasladado
6 de diciembre	Día de la Constitución Española
8 de diciembre	Inmaculada Concepción
27 de enero	Santo Tomás de Aquino
20 de marzo	Traslado de la festividad de San José
1 de mayo	Día del Trabajo
2 de mayo	Festividad Comunidad de Madrid
15 de mayo	Madrid, festividad de San Isidro
Del 22 de diciembre al 8 de enero	Vacaciones de Navidad
Del 31 de marzo al 10 de abril	Vacaciones de Semana Santa

*Calendario basado en el aprobado por la comisión permanente del Consejo de Gobierno de la UCM el 30/11/21, que no incluye información del calendario laboral e incluye los festivos del 2023 ( <https://www.ucm.es/calendarios> ).*

Con este calendario, la distribución de días lectivos por semestre y día de la semana resulta ser el reflejado en la tabla de la derecha.

**Viernes 16/12/22 y miércoles 10/5/22 serán para recuperación de clases, según procedimiento a precisar.**

	L	M	X	J	V	días
<b>S1</b>	13	13	13	14	15	68
<b>S2</b>	12	14	15	14	12	67



## Facultad de Ciencias Físicas Calendario académico del curso 2022-23

(Aprobado en Junta de Facultad del 20-12-21)



Septiembre							Octubre							Noviembre								
L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D		
			1	2	3	4						1	2		1	2	3	4	5	6		
5	6	7	8	9	10	11	3	4	5	6	7	8	9	7	8	9	10	11	12	13		
12	13	14	15	16	17	18	10	11	12	13	14	15	16	14	15	16	17	18	19	20		
19	20	21	22	23	24	25	17	18	19	20	21	22	23	21	22	23	24	25	26	27		
26	27	28	29	30			24	25	26	27	28	29	30	28	29	30						
							31															
Diciembre 2022							2023 Enero							Febrero								
L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D		
			1	2	3	4							1			1	2	3	4	5		
5	6	7	8	9	10	11	2	3	4	5	6	7	8	6	7	8	9	10	11	12		
12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	13	14	15	16	17	18	19		
19	20	21	22	23	24	25	16	17	18	19	20	21	22	20	21	22	23	24	25	26		
26	27	28	29	30	31		23	24	25	26	27	28	29	27	28							
							30	31														
Marzo							Abril							Mayo								
L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D		
			1	2	3	4	5						1	2	1	2	3	4	5	6	7	
6	7	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7	8	9	8	9	10	11	12	13	14		
13	14	15	16	17	18	19	10	11	12	13	14	15	16	15	16	17	18	19	20	21		
20	21	22	23	24	25	26	17	18	19	20	21	22	23	22	23	24	25	26	27	28		
27	28	29	30	31			24	25	26	27	28	29	30	29	30	31						
Junio							Julio							Agosto								
L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D		
			1	2	3	4						1	2				1	2	3	4	5	6
5	6	7	8	9	10	11	3	4	5	6	7	8	9	7	8	9	10	11	12	13		
12	13	14	15	16	17	18	10	11	12	13	14	15	16	14	15	16	17	18	19	20		
19	20	21	22	23	24	25	17	18	19	20	21	22	23	21	22	23	24	25	26	27		
26	27	28	29	30			24	25	26	27	28	29	30	28	29	30	31					
							31															

clases semestre 1      clases semestre 2      parciales de 1º GF      x no lectivos

exámenes      lectura TFGs      entrega de actas

Convocatorias extraordinarias de Prácticas de Master y TFM en septiembre.

[Fechas del 2023 incluyendo ya festivos aprobados para ese año].

Clases: S1: 5septiembre-16diciembre. S2: 23enero-10mayo

16 recuperación LMX

10 recuperación L y V

Exámenes semestre 1: 19diciembre-20enero

Exámenes semestre 2: 11-31 de mayo

Exámenes extraordinarios: 12-30 de junio

	L	M	X	J	V	días
S1	13	13	13	14	15	68
S2	12	14	15	14	12	67

## ANEXO. Enlaces de interés

A continuación, se muestran algunos enlaces que pueden ser de utilidad para los alumnos de la titulación. La mayoría de ellos se pueden consultar en la página web de la secretaría de Físicas <https://fisicas.ucm.es/secretaria-de-estudiantes>. También puede consultarse la normativa general de la UCM en los enlaces [www.ucm.es/normativa](http://www.ucm.es/normativa), <https://www.ucm.es/estudiar> y <https://www.ucm.es/grado>.

### Normas de matrícula y de permanencia

Normativa general de la UCM:

Instrucciones de gestión de la Matrícula (estudios oficiales de Grado y Máster)  
<https://www.ucm.es/matricula-estudios-oficiales>

Anulación de matrícula <https://www.ucm.es/anulacion-de-matricula-1>

Tribunales de Compensación <https://fisicas.ucm.es/estudios-de-grado>

Normas de permanencia <https://www.ucm.es/permanencia-en-la-universidad->

Normativa específica de la Facultad de CC Físicas:

Alumnos de nuevo acceso <https://fisicas.ucm.es/matriculanuevoingreso>

Resto de alumnos <https://fisicas.ucm.es/matricula-resto-de-alumnos>

### Reconocimiento de créditos <http://fisicas.ucm.es/reconocimiento-creditos-grado>

Dicho reconocimiento puede obtenerse por:

Realización de actividades universitarias culturales, deportivas, de representación estudiantil, solidarias y de cooperación de la UCM (BOUC no.18 del 8/9/2016)  
<http://pendientedemigracion.ucm.es/bouc/pdf/2470.pdf>

Asignaturas superadas en otros estudios

<https://www.ucm.es/continuar-estudios-iniciados-en-el-extranjero>

## Control de cambios

Versión	Fecha modificación	Cambio efectuado	Secciones afectadas	Páginas afectadas
V0	29/05/2022	Versión Provisional. Pendiente de aprobación Junta de Facultad		
V1.0	20/06/2022	Versión revisada. Pendiente de aprobación Junta de Facultad		
V2.0	04/07/2022	Versión aprobada en Junta de Facultad el 29/06/2022		
V2.1	14/07/2022	Cambio numeración despachos	2	8-61
V2.2	10/10/2022	Actualización de la tabla de días no lectivos y festivos y calendario	4	65-66
V2.3	3/11/2022	Corrección de erratas	1	10, 44
V2.4	23/10/2022	Corrección aulas segundo cuatrimestre	2	11, 15, 22, 30, 33, 37, 41, 47, 55