



Asignatura: Entrelazamiento Cuántico e Información  
Código: 32562  
Centro: Facultad de Ciencias  
Titulación: Máster en Física Teórica  
Nivel: Máster  
Tipo: Optativa  
Nº de créditos: 6 ETCS

## ASIGNATURA / COURSE TITLE

Entrelazamiento Cuántico e Información/ Quantum Entanglement and Information

### 1.1. Código / Course number

32562

### 1.2. Materia / Content area

Física Teórica/[Theoretical Physics](#)

### 1.3. Tipo / Course type

Formación optativa / [Elective subject](#)

Se trata de un curso optativo orientado a la especialidad de “Partículas Elementales y Cosmología” / It is an elective course specifically designed for the branch on “Elementary Particles and Cosmology”

### 1.4. Nivel / Course level

Máster / [Master \(second cycle\)](#)

### 1.5. Curso/ Year

1º / 1st

### 1.6. Trimestre / Trimester

2º trimestre / [2nd trimester](#)

### 1.7. Idioma / Language

Ingles/ [English](#), se permiten preguntas, ejercicios y examen escrito en español

### 1.8. Requisitos previos / Prerequisites

Dominio sólido de los contenidos del grado/licenciatura de Física en sus versiones más teóricas o conocimientos equivalentes.



Asignatura: Etnrelazamiento Cuántico e Información  
Código: 32562  
Centro: Facultad de Ciencias  
Titulación: Máster en Física Teórica  
Nivel: Máster  
Tipo: Optativa  
Nº de créditos: 6 ETCS

## 1.9. Requisitos mínimos de asistencia a las sesiones presenciales / **Minimum attendance requirement**

La asistencia es obligatoria / [Attendance is mandatory](#)

## 1.10. Datos del equipo docente / **Faculty data**

Docente(s) / [Lecturer\(s\)](#): German Sierra Rodero (coordinador)  
Departamento de / [Department of](#): Instituto de Física Teórica  
Facultad / [Faculty](#)  
Despacho [Office](#): IFT 404  
Teléfono / [Phone](#): +34 2999-824  
Correo electrónico/[Email](#): german.sierra@uam.es  
Página web/[Website](#):  
Horario de atención al alumnado/[Office hours](#): upon appointment

## 1.11. Objetivos del curso / **Course objectives**

### RESULTADOS DE APRENDIZAJE:

Conocer la teoría de la información cuántica y la computación cuántica. Manejar el concepto de entrelazamiento cuántico, tanto como un recurso para la computación cuántica y la comunicación como una herramienta útil para caracterizar sistemas cuánticos de muchas partículas. Familiarizarse con las implementaciones físicas para computación cuántica y simulación cuántica.

Estos resultados de aprendizaje contribuyen a la adquisición de las siguientes competencias del curso:

### COMPETENCIAS BÁSICAS Y GENERALES:

CG3 - Manejar las principales fuentes de información científica, siendo capaces de buscar información relevante a través de internet, de las bases de datos bibliográficas y de la lectura crítica de trabajos científicos, conociendo la bibliografía especializada en Física Teórica: Partículas Elementales, Cosmología y Astrofísica.

CG4 - Elaborar un trabajo escrito con datos bibliográficos, teóricos y/o experimentales, escribiendo un resumen o articulado en extenso - tal y como se realizan los artículos científicos-, formulando hipótesis razonables, composiciones originales y conclusiones motivadas.

CG5 - Presentar públicamente los resultados de una investigación o un informe técnico, comunicar las conclusiones a un tribunal especializado, personas u organizaciones interesadas, y debatir con sus miembros cualquier aspecto relativo a los mismos.



Asignatura: Etnrelajamiento Cuántico e Información  
Código: 32562  
Centro: Facultad de Ciencias  
Titulación: Máster en Física Teórica  
Nivel: Máster  
Tipo: Optativa  
Nº de créditos: 6 ETCS

CG2 - Saber trabajar en equipo y comunicarse con la comunidad académica en su conjunto y con la sociedad en general acerca de la Física Teórica: Partículas Elementales, Cosmología y Astrofísica de nueva generación y sus implicaciones académicas, productivas o sociales.

CG1 - Desarrollar destrezas teóricas y experimentales que permitan aplicar a entornos nuevos o poco conocidos, dentro de contextos más amplios (o multidisciplinares), los conceptos, principios, teorías o modelos adquiridos y relacionados con los retos que actualmente plantea la sociedad en lo referente a la Física Teórica: Partículas Elementales, Cosmología y Astrofísica.

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.

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.

#### COMPETENCIAS ESPECÍFICAS:

CE6 - La adquisición de conocimientos avanzados, tanto desde el punto de vista teórico (nuevos conceptos y teorías, desarrollos formales, herramientas matemáticas avanzadas, etc.) como experimental (resultados experimentales que han conducido a nuevas teorías, técnicas experimentales avanzadas, etc.), en la física de partículas, astrofísica y cosmología.

CE7 - La adquisición de conocimientos en la vanguardia de la investigación en las áreas de física de partículas, astrofísica y cosmología: teorías y experimentos actualmente en desarrollo, problemas abiertos de las teorías consolidadas, y nuevas áreas de investigación resultantes de la interconexión de diferentes disciplinas.

CE8 - La capacidad para realizar un análisis crítico de una teoría o experimento reciente o de vanguardia en las áreas de física de partículas, astrofísica y cosmología, basándose en la consistencia lógica del desarrollo formal, la rigurosidad de las técnicas (matemáticas o experimentales) empleadas, y la consistencia con los conocimientos previos. Asimismo, la capacidad de síntesis de nuevas ideas y técnicas (tanto teóricas como experimentales) para abordar los problemas abiertos de las teorías consolidadas en la física de partículas, astrofísica y cosmología.

CE9 - La capacidad de comunicar los conocimientos avanzados en la física de partículas, astrofísica y cosmología: descripción del fenómeno tanto desde un punto de vista teórico (conceptos, desarrollos formales, técnicas matemáticas) como



Asignatura: Etnrelazamiento Cuántico e Información  
Código: 32562  
Centro: Facultad de Ciencias  
Titulación: Máster en Física Teórica  
Nivel: Máster  
Tipo: Optativa  
Nº de créditos: 6 ETCS

experimental (resultados obtenidos de las observaciones, técnicas utilizadas) y su comprensión en el contexto de las teorías ya consolidadas.

CE10 - La capacidad para abordar y resolver un problema avanzado en la física de partículas, astrofísica y cosmología, mediante la elección adecuada del contexto teórico, la identificación de los conceptos relevantes y el uso de las técnicas matemáticas que constituyen la mejor aproximación para así llegar a la solución.

## 1.12. Contenidos del programa / **Course contents**

1. INTRODUCCIÓN Y VISIÓN GENERAL. La información es física. Información cuántica vs. Información clásica. Entrelazamiento como recurso para la información cuántica. Máquinas de Turing clásicas y cuánticas. El computer cuántico. Por qué los físicos teóricos deben prestar atención a los computadores cuánticos?
2. FUNDAMENTOS DE LA TEORIA CUÁNTICA. Estados y conjuntos ('ensembles'). Operadores densidad. Formalismo de la matriz densidad. Medidas y evolución. Medidas ortogonales. Medidas generalizadas. Medidas de operadores de proyección. El teorema de Neumark. Superoperadores.
3. EL BIT CUÁNTICO. Caracterización de estados de un qubit, Hamiltonianos y medidas. Representación esférica de Bloch. Realizaciones físicas de qubits.
4. ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO. Sistemas compuestos. Estados producto vs estados entrelazados. Operaciones locales y comunicación clásica. Operaciones de entrelazamiento. Medidas de entrelazamiento. Sistemas bipartitos. Descomposición de Schmidt. Matriz densidad reducida. Estados de máximo entrelazamiento. Entrelazamiento y mezcla. Entropía de entrelazamiento
5. EL SISTEMA DE DOS QUBITS. Caracterización de estados entrelazados de dos qubits. Estados de Bell. Realización física de pares de Bell con parejas de fotones o átomos.



Asignatura: Etnrelazamiento Cuántico e Información  
Código: 32562  
Centro: Facultad de Ciencias  
Titulación: Máster en Física Teórica  
Nivel: Máster  
Tipo: Optativa  
Nº de créditos: 6 ETCS

6. USOS DEL ENTRELAZAMIENTO. Máquinas posibles. Código denso. Teleportación cuántica. Criptografía cuántica. Máquinas imposibles. Comunicación más lenta que la luz. El teorema de no clonado.
7. DESIGUALDADES DE BELL. Localidad de Einstein y variables ocultas. La paradoja de Einstein, Podolski y Rosen. No separabilidad de pares EPR. Información cuántica escondida. Desigualdades de Bell. Test experimental de las desigualdades de Bell. El experimento Aspect.
8. COMPUTACIÓN CUÁNTICA. Computación clásica vs. Computación cuántica. Complejidad computacional. Circuitos cuánticos. Puertas cuánticas. Puertas cuánticas universales. Algoritmos cuánticos. El algoritmo Deutsch. El algoritmo cuántico de búsqueda de bases de datos de Grover. El algoritmo de factorización de Shor.
9. SIMULACIÓN CUÁNTICA. El simulador cuántico de Feynman. La complejidad de la simulación cuántica. Realización física de un simulador cuántico. Ejemplo: átomos ultrafríos en redes ópticas. La herramienta de Hubbard. Simulación cuántica de pares de Bell. Simulación cuántica de fases de muchos cuerpos fuertemente correlacionados.
10. COMPUTACIÓN CUÁNTICA TOPOLÓGICA. Errores cuánticos. Corrección de errores cuánticos. Computación cuántica a prueba de fallos. Códigos cuánticos. Orden topológico. Ejemplos de fases topológicas en la naturaleza. Sistemas de efecto Hall cuántico fraccionario. Aniones. Aniones Abelianos y no-Abelianos. El código 'toric' de Kitaev. El bit cuántico topológico.
11. ENTRELAZAMIENTO EN SISTEMAS DE MUCHOS CUERPOS. Entrelazamiento como una herramienta útil para caracterizar fases cuánticas y transiciones de fase cuánticas. La ley del área de la entropía de entrelazamiento. Grupo de renormalización de la matriz densidad y redes tensoriales. Aplicaciones a sistemas de retículo de espín.



Asignatura: Etnrelazamiento Cuántico e Información  
 Código: 32562  
 Centro: Facultad de Ciencias  
 Titulación: Máster en Física Teórica  
 Nivel: Máster  
 Tipo: Optativa  
 N° de créditos: 6 ETCS

### 1.13. Referencias de consulta / Course bibliography

M.A. Nielsen and I.L. Chuang, 'Quantum computation and quantum information'.  
 Cambridge University Press, Cambridge, UK (2000).

J. Preskill, Notes on Quantum Computation.

N.D. Mermin, 'Quantum computer science: an introduction'. Cambridge University  
 Press, Cambridge, UK (2007).

### 2. Métodos docentes / Teaching methodology

Lecciones magistrales y trabajo tutelado.

### 3. Tiempo de trabajo del estudiante / Student workload

		Nº de horas	Porcentaje
Presencial	Clases teóricas	32 h	44 %
	Clases prácticas	10 h	
	Tutorías programadas a lo largo del trimestre	20 h	
	Realización del examen final	4 h	
No presencial	Trabajo personal y otras actividades	84 h	56 %
<b>Carga total de horas de trabajo: 25 horas x 6 ECTS</b>		<b>150 h</b>	<b>100 %</b>

### 4. Métodos de evaluación y porcentaje en la calificación final / Evaluation procedures and weight of components in the final grade

Examen escrito que se podrá complementar con la resolución de ejercicios propuestos y exposición de trabajo.



Asignatura: Etnrelazamiento Cuántico e Información  
 Código: 32562  
 Centro: Facultad de Ciencias  
 Titulación: Máster en Física Teórica  
 Nivel: Máster  
 Tipo: Optativa  
 Nº de créditos: 6 ETCS

Dichos criterios se aplican tanto a la convocatoria ordinaria como a la extraordinaria.

## 5. Cronograma\* / Course calendar

Semana Week	Contenido Contents	Horas presenciales Contact hours	Horas no presenciales Independent study time
3	Tema 3	4	8
4	Tema 4	4	8
5	Tema 5	4	8
6	Tema 6	4	8
7	Tema 7	4	8
8	Tema 8	4	8
9	Tema 9	4	8
10	Temas 10 y 11	4	8

\*Este cronograma tiene carácter orientativo.