

**FICHA IDENTIFICATIVA****Datos de la Asignatura**

|                        |                 |
|------------------------|-----------------|
| <b>Código</b>          | 34276           |
| <b>Nombre</b>          | Óptica Cuántica |
| <b>Ciclo</b>           | Grado           |
| <b>Créditos ECTS</b>   | 6.0             |
| <b>Curso académico</b> | 2019 - 2020     |

**Titulación(es)**

| <b>Titulación</b>      | <b>Centro</b>      | <b>Curso</b> | <b>Periodo</b>       |
|------------------------|--------------------|--------------|----------------------|
| 1105 - Grado en Física | Facultad de Física | 4            | Segundo cuatrimestre |

**Materias**

| <b>Titulación</b>      | <b>Materia</b>              | <b>Caracter</b> |
|------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1105 - Grado en Física | 16 - Complementos de Física | Optativa        |

**Coordinación**

| <b>Nombre</b>                      | <b>Departamento</b>                               |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| ROLDAN SERRANO, EUGENIO            | 280 - Óptica y Optometría y Ciencias de la Visión |
| VALCARCEL GONZALVO, GERMAN JOSE DE | 280 - Óptica y Optometría y Ciencias de la Visión |

**RESUMEN**

**Descriptores:** Teoría cuántica de la luz, fotones, estados coherentes, luz comprimida, luz no clásica, interacción luz-átomos, fotodetección, teoría del láser.

**Objetivos:** Con esta asignatura se pretende que los estudiantes logren un conocimiento básico sobre la naturaleza cuántica de la luz y sobre la interacción de esta (dentro el dominio óptico del espectro electromagnético, que excluye frecuencias superiores a los rayos X e inferiores a las microondas) con la materia, principalmente con átomos y moléculas. Tras cuantificar el campo, se estudian los estados coherentes del campo electromagnético y se discuten sus propiedades. A continuación se abordan los procesos básicos de interacción (emisión espontánea, emisión y absorción estimuladas). Después de estudiar la fotodetección (esencial por entender capitalmente la naturaleza cuántica de la luz), se presta particular atención a los denominados «estados no clásicos» de la radiación, como por ejemplo los estados comprimidos (*squeezed states*), estudiándose la forma en que pueden ser generados. También se aborda una introducción al entrelazamiento cuántico y a sus implicaciones en óptica cuántica.



A parte de todo esto, también es un objetivo entender los aspectos fundamentales de la teoría semiclásica de la interacción luz-materia (en la que el campo es tratado clásicamente) con la intención de obtener las ecuaciones fundamentales de la teoría semiclásica del láser (ecuaciones de Maxwell-Bloch). Los estudios de esta incluye algunos fenómenos de dinámica no lineal en la emisión de los láseres (como por ejemplo el caos determinista) que son de interés transversal.

**Relación con asignaturas anteriores:** La óptica cuántica se basa en los cursos obligatorios de óptica, electromagnetismo y mecánica cuántica. Los conocimientos impartidos en esta asignatura no han sido tratados en ninguna cabeza otra, con la excepción de la óptica, en la que se trata la teoría del láser con ecuaciones de balance de Einstein, y la mecánica cuántica, que trata (parcialmente) algunos aspectos que son desarrollados con más profundidad en la óptica cuántica.

## CONOCIMIENTOS PREVIOS

### Relación con otras asignaturas de la misma titulación

No se han especificado restricciones de matrícula con otras asignaturas del plan de estudios.

### Otros tipos de requisitos

Es necesario un conocimiento básico del electromagnetismo clásico, de la mecánica cuántica y también de la óptica clásica. Todos estos conocimientos se adquieren cursando las asignaturas correspondientes del grado de física.

## COMPETENCIAS

### 1105 - Grado en Física

- Poseer y comprender los fundamentos de la Física en sus aspectos teóricos y experimentales, así como el bagaje matemático necesario para su formulación.
- Saber aplicar los conocimientos adquiridos a la actividad profesional, saber resolver problemas y elaborar y defender argumentos, apoyándose en dichos conocimientos.
- Ser capaz de reunir e interpretar datos relevantes para emitir juicios.
- Ser capaz de transmitir información, ideas, problemas y soluciones tanto a un público especializado como no especializado.
- Desarrollo de habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un elevado grado de autonomía.
- Resolución de problemas: Ser capaz de evaluar claramente los órdenes de magnitud, de desarrollar una percepción de las situaciones que son físicamente diferentes pero que muestran analogías, permitiendo, por lo tanto, el uso de soluciones conocidas a nuevos problemas.
- Modelización y resolución de problemas: Ser capaz de identificar los elementos esenciales de un proceso/situación y de establecer un modelo de trabajo del mismo. Ser capaz de realizar las aproximaciones requeridas con el objeto de reducir un problema hasta un nivel manejable. Pensamiento crítico para construir modelos físicos.



- Investigación básica y aplicada: Adquirir una comprensión de la naturaleza de la investigación Física, de las formas en que se lleva a cabo, y de cómo la investigación en Física es aplicable a muchos campos diferentes, por ejemplo la ingeniería; habilidad para diseñar procedimientos experimentales y/o teóricos para: (i) resolver los problemas corrientes en la investigación académica o industrial; (ii) mejorar los resultados existentes
- Destrezas generales y específicas en lenguas extranjeras: Haber mejorado el dominio del inglés (o de otra lengua extranjera de interés) a través de: acceso a bibliografía fundamental, comunicación oral y escrita (inglés científico-técnico), cursos, estudios en el extranjero, reconocimiento de créditos en universidades extranjeras etc.
- Búsqueda de bibliografía: Ser capaz de buscar y utilizar bibliografía en Física y otra bibliografía técnica, así como cualquier fuente de información relevante para trabajos de investigación y desarrollo técnico de proyectos.
- Capacidad de aprendizaje: Ser capaz de iniciarse en nuevos campos de la Física y de la ciencia y tecnología en general, a través del estudio independiente.
- Comunicación oral y escrita: Ser capaz de transmitir información, ideas, problemas y soluciones mediante la argumentación y el razonamiento propios de la actividad científica, utilizando los conceptos y herramientas básicas de la Física.
- Cultura General en Física: Haberse familiarizado con los aspectos más importantes de la materia, y con enfoques que abarcan y relacionan diferentes áreas de la física.

## RESULTADOS DE APRENDIZAJE

Adquirir conocimientos básicos de:

- la naturaleza cuántica de la luz.
- la interacción de la luz con la materia, principalmente con átomos y moléculas.

En particular:

- La cuantización no relativista de la luz.
- La variedad de estados de la luz y saber distinguir las características cuánticas de las clásicas.
- Los procesos básicos de interacción (absorción y emisión).
- El proceso de fotodetección y su aplicación a la caracterización de estados.
- En qué consiste el entrelazamiento cuántico y su utilidad.
- Los fundamentos de la teoría semiclásica de la interacción luz-átomos y su aplicación al láser.
- Los aspectos básicos de la dinámica no lineal del láser.

Además de las propias de la titulación:

- Capacidad para comprender y sintetizar los problemas planteados con la finalidad de llegar a su solución.
- Capacidad de trabajar de forma organizada. Establecer planes de trabajo que permiten obtener los resultados deseados de la forma más directa.
- Habilidad en la búsqueda de información a partir de la bibliografía.
- Interpretación de gráficos.
- Capacidad para trabajar en grupo.



- Uso de nuevas tecnologías.
- Capacidad por elaborar textos y memorias sobre los trabajos realizados de forma comprensible y organizada.
- Rigor a la hora de valorar el trabajo realizado por un mismo. Ser capaz de identificar las causas de los errores y buscar posibles soluciones.
- Capacidad para identificar y valorar la importancia de los conceptos científicos rebuscados con sus aplicaciones a otros campos de la ciencia y a la mejora del bienestar social.
- Capacidad para la comunicación científica, tanto oral como escrita, en el ámbito académico y en el divulgativo.
- Habilidad para argumentar desde criterios racionales y científicos, tanto en el ámbito académico como divulgativo, evitando prejuicios.
- Actitudes y valores que establecen condiciones para desarrollar un comportamiento ético en el desarrollo de la actividad profesional.

## DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS

### 1. Teoría Semiclásica de la interacción luz-átomos

1. Introducción. El átomo de dos niveles.
2. Hamiltoniano de interacción.
3. Ecuaciones de evolución. Aproximación de onda rotante
4. Oscilaciones de Rabi
5. Átomo vestido
6. Pulsos
7. Disipación. La matriz densidad. Ecuaciones ópticas de Bloch
8. El índice de refracción
9. Átomos de tres niveles. Procesos a dos fotones, Raman e híper-Raman

Seminario: Teoría semiclásica del láser

1. El láser de dos niveles en anillo
2. Amplificación en un medio de dos niveles
3. El láser: emisión monomodo
4. Modelo de Lorenz-Haken
5. Análisis lineal de estabilidad
6. Pulsaciones espontáneas y rutas al caos

### 2. Cuantización del campo electromagnético libre

1. Cuantización canónica de un oscilador armónico. Operadores de creación y destrucción
2. El campo em libre: potenciales e invariancia gauge
3. El lagrangiano estándar del campo em. Esquema de cuantización estándar
4. Cuantización canónica de un modo de una cavidad Fabry-Perot
5. Hamiltoniano del campo em libre
5. Operadores campo eléctrico y magnético. Operadores momento lineal y momento angular
6. Imágenes de evolución temporal



### 3. Fotones y el vacío cuántico

1. Estados número o de Fock: fotones
2. El campo eléctrico de un estado de Fock
3. El vacío em. Fluctuaciones cuánticas
4. El efecto Casimir

### 4. Estados coherentes

1. Estados cuasiclásicos del campo electromagnético
2. Desarrollo de los estados coherentes en la base de Fock
3. El operador desplazamiento
4. Propiedades físicas de los estados coherentes
5. Propiedades matemáticas de los estados coherentes

### 5. Estados comprimidos

1. Los operadores cuadratura del campo
2. Detección homodina compensada
3. Introducción a la compresión cuántica
4. El operador de compresión
5. Conversión paramétrica a la baja
6. Estados comprimidos

### 6. Teoría cuántica de la interacción luz-átomos

1. Hamiltoniano dipolar eléctrico
2. Procesos elementales
3. Emisión espontánea. Teoría de Weisskopf-Wigner
4. Decaimiento. Emisión espontánea en cavidades
5. Desplazamiento de los niveles atómicos. El desplazamiento Lamb
6. Renormalización de la masa

### 7. El modelo de Jaynes-Cummings

1. Introducción. El modelo de Rabi
2. El modelo de Jaynes-Cummings
3. Ion atrapado en interacción con luz clásica
4. Resolución de la ecuación de Schrödinger
5. Evolución de las propiedades atómicas
6. Evolución de las propiedades del campo
7. Observaciones experimentales

**8. Fotodetección y coherencia cuánticas**

1. Introducció
2. Teoria semi-clàssica de la fotodetecció i la coherència
3. Teoria quàntica de la fotodetecció i la coherència

**9. Entanglement**

1. Estados entangled
2. Matriz densidad. Estados puros y estados mezcla. Purificación
3. Generación de estados entangled en sistemas ópticos
4. El argumento EPR
5. El teorema de Bell
6. Comprobaciones ópticas del teorema de Bell
7. Aplicaciones de los estados entangled

**VOLUMEN DE TRABAJO**

| ACTIVIDAD                            | Horas         | % Presencial |
|--------------------------------------|---------------|--------------|
| Clases de teoría                     | 60,00         | 100          |
|                                      | 0,00          | 100          |
| Elaboración de trabajos individuales | 20,00         | 0            |
| Estudio y trabajo autónomo           | 45,00         | 0            |
| Lecturas de material complementario  | 5,00          | 0            |
| Resolución de casos prácticos        | 20,00         | 0            |
| <b>TOTAL</b>                         | <b>150,00</b> |              |

**METODOLOGÍA DOCENTE**

Esta asignatura tiene clases de dos tipos. Una se corresponde con las clases teóricas o teórico-prácticas en las que se potencia, tanto como es posible, la participación de los estudiantes. Este es el tipo de clase más común en esta asignatura (52 de las 60 horas previstas). Durante estas clases el profesor presenta de forma ordenada y autocontenida (hasta dónde es posible) los contenidos de los siete temas del programa.

El otro tipo se corresponde con los seminarios y se subdividen en dos tipos: la mitad de los seminarios son de carácter teórico (la diferencia con las clases descritas hace poco radica en que no se pretende que sean tan completas ni autocontenidas). El que se pretende es que el estudiante aprenda a seguir de una manera más relajada los contenidos de una parte de la materia, sobretodo potenciando la intuición y concentrando el esfuerzo en el estudio de los modelos deducidos. La otra mitad de los seminarios son de carácter práctico puesto que en ellos se aprende como se construyen y utilizan los programas informáticos necesarios para llevar a término las simulaciones previstas.



## EVALUACIÓN

Hay dos sistemas de evaluación:

1. Exámenes escritos. Se evaluará la comprensión de los aspectos teóricos, conceptuales y de formalismo de la asignatura, la capacidad de aplicación de estos a la resolución de problemas y la capacidad crítica respecto a los resultados obtenidos. En todo caso se valorará una correcta argumentación y una adecuada justificación.
2. Evaluación continua. Basada en la realización de trabajos, memorias, resolución de problemas y cuestiones y otras actividades. Los resultados podrán ser presentados tanto mediante documentos escritos como oralmente.

El peso de cada apartado es: 60% para los exámenes y 40% para la evaluación continua.

## REFERENCIAS

### Básicas

- R. Loudon, The quantum theory of light (Clarendon Press, 1983)
- P. Milonni i J.H. Eberly, Lasers (John Wiley and Sons, 1988)
- Ch.C. Gerry i P.L. Knight, Introductory Quantum Optics (Cambridge University Press, 2005)

### Complementarias

- C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc i G. Grynberg, Photons and atoms. Introduction to Quantum Electrodynamics (John Wiley and Sons, 1989)
- H. Haken, Light (vols. 1 i 2) (North Holland, 1985)
- L. Mandel i E. Wolf, Optical coherence and Quantum Optics (Cambridge University Press, 1995)
- L. Allen and J.H. Eberly, Optical resonance and two-level atoms (Dover, 1987)
- W.H. Louisell, Quantum statistical properties of radiation (Oxford University Press, 2000)
- W. Vogel i D.-G. Welsch, Lectures on quantum optics (Akademie Verlag, 1994).
- M.O. Scully i M.S. Zubairy, Quantum Optics (Cambridge University Press, 1997)

## ADENDA COVID-19

**Esta adenda solo se activará si la situación sanitaria lo requiere y previo acuerdo del Consejo de Gobierno**



## **1. Contenidos**

Se reducen los contenidos recogidos en la guía docente: de un total de 9 temas, se ha eliminado el tema 9 y la mitad del tema 6.

El tema 9 (un tema largo) está dedicado al “entanglement” y no parecía sencillo que los estudiantes abordasen este complicado tema autónomamente.

Del tema 6, dedicado a la interacción luz-átomos, se han eliminado los aspectos menos esenciales de la absorción y emisión estimuladas (bien cubiertas en el tema 1 dedicado a la teoría semiclásica) y nos hemos centrado en la emisión espontánea.

Se puede estimar que se ha eliminado alrededor de un 15% de los contenidos inicialmente previstos.

## **2. Volumen de trabajo y planificación temporal de la docencia**

En el momento del cese de las clases, ya se había impartido la teoría hasta el tema 5 incluido. Durante el confinamiento, los estudiantes tienen que estudiar los temas 6, 7 y 8 y realizar tareas de evaluación continua (véase el apartado 4 más abajo). En un principio tenían que entregar una memoria de prácticas y entregar y exponer en clase dos ejercicios (la práctica se llevó a cabo antes del cese de clases). Esto se ha visto modificado a la entrega de cuatro ejercicios más la memoria de prácticas (debido a la modificación del peso de la evaluación continua).

Así, el encargo de ejercicios evaluables para la evaluación continua ha sufrido relativamente poco cambio con respecto al curso previsto inicialmente.

## **3. Metodología docente**

Subida de materiales a Aula virtual, y comunicación con los estudiantes a través del correo electrónico.

Durante el confinamiento, se ha proporcionado materiales (apuntes elaborados, material bibliográfico adicional y guías de estudio) para el estudio de los temas 6, 7 y 8. No se han realizado clases online, únicamente se han atendido dudas por correo electrónico.

## **4. Evaluación**

a) Evaluación continua: ha pasado de pesar un 40% a pesar un 60%. Esta parte de la evaluación consta de:

- evaluación de ejercicios del tema 1 (teoría semiclásica), ya realizada antes del cese de clases
- evaluación de la memoria de prácticas (ya encargada)
- evaluación de cuatro ejercicios del resto del temario

Esta última parte evaluaba originalmente dos ejercicios, que han pasado a ser cuatro. Esto justifica el incremento del peso de la evaluación continua.

b) Examen: su peso ha pasado del 60% al 40% de la nota. Prevemos una prueba escrita abierta distribuida por aula virtual en la que se evaluará de parte del temario (temas 4, 5, 7 y 8).

## **5. Bibliografía**



Se ha depositado en Aula virtual apuntes de los temas no impartidos antes del cese de las clases, así como algún material complementario adicional (dos capítulos de libro y un artículo tutorial).

