

GRADO EN FÍSICA

GUÍA DOCENTE

Física Cuántica I

Curso Tercero

Departamento de Física Teórica

Facultat de Física

Universitat de València

I.- DATOS INICIALES DE IDENTIFICACIÓN

Nombre de la asignatura	Física Cuántica I
Nombre de la materia	Física Cuántica
Número de créditos ECTS	6
Carácter	Obligatoria
Titulación	Grado en Física
Curso/Cuatrimestre	Tercero/Quinto
Departamento: Página web:	Física Teórica http://www.uv.es/fisteo/

II.- INTRODUCCIÓN A LA ASIGNATURA

Carácter de la asignatura: Obligatoria.

Créditos ECTS asignados: 6 ECTS.

Duración temporal: Cuatrimestral, Primer Cuatrimestre

Ubicación en el grado: 3er Curso.

Contenidos: Física Cuántica I

Los orígenes de la Física Cuántica, física cuántica elemental, ecuación de Schrödinger en una dimensión, observables cuánticos: operadores y medida, potenciales unidimensionales, efecto túnel y penetración en zonas clásicamente prohibidas, estados ligados: el pozo cuadrado finito e infinito, el oscilador armónico.

Objetivos:

El objetivo de esta asignatura es familiarizar al alumno con los fenómenos cuánticos y sus propiedades fundamentales e introducir las técnicas matemáticas básicas para formalizar la descripción de los mismos en una teoría lógicamente consistente.

Relación con otras materias previas:

Es muy recomendable que el alumno haya cursado previamente las asignaturas de Matemáticas, Álgebra y Geometría, que proporciona el bagaje algebraico necesario para la descripción formal de la Física Cuántica como espacios vectoriales, productos internos, matrices, determinantes, operadores lineales y su diagonalización; Cálculo, en la que se estudia cálculo integral y diferencial, y se introducen las ecuaciones diferenciales; Métodos Matemáticos, en la que se profundiza en la resolución de las ecuaciones diferenciales que aparecen en multitud de problemas cuánticos y se introducen las transformadas de Fourier y el método de separación de variables; Física General, donde se establecen los fundamentos de la física que se estudiará más profundamente en este curso; Mecánica y Oscilaciones y Ondas, en las que se desarrollan conceptos fundamentales para la Física Cuántica como la formulación lagrangiana y hamiltoniana, el movimiento ondulatorio y la descripción de las propiedades de las ondas, y Termodinámica y Física Estadística, donde se discuten los fundamentos de la Física Estadística de Boltzmann, Maxwell y Gibbs, cuya influencia en la génesis de la Física Cuántica fue capital.

Mención especial merece la asignatura de Laboratorio de Física Cuántica, encuadrada en la materia del tercer curso, Laboratorios Experimentales de Física. En ella el alumno realiza algunas de las experiencias más importantes que dieron lugar al desarrollo de las ideas cuánticas. Durante las primeras semanas del curso de Física Cuántica I se estudian los orígenes, las bases experimentales y los conceptos fundamentales de la llamada Física Cuántica Antigua, previa a la formulación de Heisenberg y de Schrödinger, y se describen con detalle las experiencias del Laboratorio de Física Cuántica. Es, pues, imprescindible cursar esta materia en paralelo con la Física Cuántica I.

Relación con otras materias futuras:

El curso de Física Cuántica II se basa en el conocimiento adquirido en la asignatura de Física Cuántica I. Deben, pues, cursarse en ese orden. Además, muchas son las asignaturas de cuarto curso y del Máster, que se basan en los conceptos aprendidos en el curso de Física Cuántica. Citaremos, entre las más importantes, las asignaturas de Mecánica Cuántica, Óptica Cuántica, Física Nuclear y de Partículas, Física del Estado Sólido, Teoría Cuántica de Campos y Partículas Elementales.

III.- VOLUMEN DE TRABAJO

Semanas de trabajo: 15 semanas, correspondientes a un cuatrimestre.

Horas de trabajo del alumno: es aconsejable no superar las 25 h/ECTS, en nuestro caso 150 h.

Horas Totales : 150 horas totales distribuidas como aparece en la tabla siguiente

TIPO DE ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	HORAS
Docencia Presencial: Asistencia a clases	Clases teórico-prácticas: 3 horas/semana x 15 semanas	45
Docencia Presencial: Asistencia a trabajos tutelados en grupos reducidos	1 hora cada semana centrada en el trabajo del estudiante y en su participación activa, donde se resolverán dudas tanto conceptuales como surgidas en la resolución de problemas y se verificará el progreso del estudiante en la materia (evaluación continua)	15
Estudio de los fundamentos teóricos	Incluye la asistencia a clase, el repaso de los conceptos discutidos en las clases teóricas, realización de demostraciones incompletas y ejercicios propuestos, búsqueda bibliográfica y preparación de exámenes.	31
Resolución de ejercicios y problemas	En las clases de problemas y trabajos tutelados se les proporcionará boletines de cuestiones, similares a los de los exámenes, y se requerirá la participación del estudiante en la resolución de los ejercicios.	56.5
Tutorías individuales	En ellas el estudiante podrá realizar consultas puntuales sobre dudas encontradas durante el estudio y en la resolución de problemas, exámenes, y bibliografía.	
TOTAL VOLUMEN DE TRABAJO		150

IV.- OBJETIVOS GENERALES

En el mundo moderno, el estudio de los fenómenos microscópicos en general, y en particular el de las propiedades de los sistemas atómicos, tiene una gran importancia económica en química, biología, ingeniería, informática, ... etc. Pero, además, es imprescindible para comprender muchas de las propiedades fundamentales de las interacciones y de la materia que forma nuestro universo.

Por desgracia, los conceptos cuánticos no son en absoluto intuitivos; más aún, muchas veces parecen contradecir nuestras experiencias cotidianas con los objetos macroscópicos, bien descritos por la física clásica. Aunque la física cuántica nació como respuesta a problemas de fenómenos microscópicos, su dominio abarca a todos los fenómenos, y también en el mundo macroscópico hay muchos fenómenos que no tienen explicación en el marco de la física clásica y es necesaria la física cuántica, incluida la propia existencia de la materia agregada con sus propiedades macroscópicas.

En esta línea, esta asignatura pretende, en primer lugar, introducir las ideas y conceptos básicos de la física cuántica, con especial atención a sus bases experimentales. Efectivamente, hay que tener

presente que la física cuántica se desarrolló como una respuesta a la incapacidad de la física clásica (mecánica y electromagnetismo) de explicar satisfactoriamente algunas de las propiedades de la radiación electromagnética y de la estructura atómica. Más tarde se comprendió que sus principios básicos pueden ser usados también para explicar las propiedades de los núcleos y de las partículas elementales y, por ello, forman la base de prácticamente todas las teorías modernas que quieren describir el universo. La base conceptual de la física cuántica, muy distinta de la de la física clásica, incluye la noción de dualidad onda-corpúsculo de la luz y de la materia, la idea de la función de onda de un sistema, su interpretación probabilística, el concepto de observable cuántico, su medida y la relación de incertidumbre entre medidas complementarias.

En segundo lugar, es necesario decir que la física cuántica es una materia difícil no sólo por lo intrincado de sus cimientos conceptuales, sino también por su complejidad matemática. En efecto, se requiere una formulación bastante abstracta para un tratamiento apropiado de esta teoría. Muchas veces, la complejidad matemática aparece en la solución de simples ecuaciones matemáticas aplicadas a ciertas situaciones físicas. Durante este curso, se estudiarán en profundidad los detalles matemáticos suficientes para obtener y entender los resultados de la física cuántica. Sin embargo, se tendrá especial cuidado en no permitir que las complejidades matemáticas oculten la simplicidad esencial de las ideas cuánticas.

Finalmente, en tercer lugar, para comprender y demostrar la potencia de los conceptos cuánticos, se discutirán una serie de aplicaciones a sistemas físicos interesantes. De esta manera, se podrá apreciar el éxito de la física cuántica en explicar los resultados de medidas físicas reales y entender que ningún experimento, hasta el momento, ha contradicho sus ideas fundamentales.

V.- CONTENIDOS MÍNIMOS

Los contenidos de la asignatura se pueden dividir en tres grandes grupos:

- **Parte I : Orígenes de la Física Cuántica: conceptos y bases experimentales**
 - 1 Los límites de la física clásica. La constante de Planck. (Tema 1)
 - 2 Cuantos de energía. Postulado de Planck. (Tema 2)
 - 3 Dualidad onda-corpúsculo y principio de indeterminación. (Tema 3)
 - 4 Ondas de materia: postulado de De Broglie. (Tema 5)
 - 5 Modelo atómico de Bohr. Reglas de cuantización. (Tema 4)
 - 6 Insuficiencia de la teoría cuántica antigua. (Tema 4)
- **Parte II : Mecánica ondulatoria de Schrödinger**
 - 6 Función de onda. Interpretación probabilística. (Tema 6)
 - 7 Ecuación de Schrödinger. (Tema 6)
 - 8 Estados estacionarios. (Tema 6)
 - 9 Observables y operadores. (Tema 7)

- 10 Probabilidades generalizadas. (Tema 7)
- 11 Valor medio y valor esperado. (Tema 8)
- 12 Límite clásico: Teoremas de Ehrenfest. (Tema 8)
- 13 Relaciones de incertidumbre. (Tema 8)
- 14 Problemas unidimensionales: dispersión. (Temas 9 y 10)
 - 14.1 Potencial constante. (Tema 9)
 - 14.2 Potencial escalón. (Tema 9)
 - 14.3 Barreras. Efecto tunel. (Tema 10)
 - 14.4 Transmisión por pozos. Efecto Ramsauer-Thomson. (Tema 10)
 - 14.5 Evolución temporal. (Tema 9)
- 15 Problemas unidimensionales: estados ligados. (Temas 11 y 12)
 - 15.1 Potencial delta. (Tema 11)
 - 15.2 Pozo cuadrado infinito. (Tema 11)
 - 15.3 Paridad. (Tema 11)
 - 15.4 Pozo cuadrado finito. (Tema 11)
 - 15.5 Polos y resonancias de la amplitud de transmisión. (Tema 11)
 - 15.6 El oscilador armónico. (Tema 12)
 - 15.7 Teorema del Virial. (Tema 12)
 - 15.8 Mecánica matricial: operadores creación-destrucción. (Tema 12)
- **Parte III : Aplicaciones de la Física Cuántica**
 - 16 Calores específicos de los sólidos. (Tema 2)
 - 17 Efecto fotoeléctrico. (Tema 3)
 - 18 Anchura natural de los niveles energéticos. (Tema 8)
 - 19 Emisión de partículas α por núcleos. (Tema 10)
 - 20 Fusión termonuclear. (Tema 10)
 - 21 El microscopio de efecto tunel. (Tema 10)

Nótese que la materia de la primera parte (puntos 1 a 5), correspondiente a la Física Cuántica antigua, servirá como introducción teórica a las experiencias que se realizarán en el Laboratorio de Física Cuántica. Por ello es altamente aconsejable que ambas materias se cursen de forma simultánea.

VI.- DESTREZAS

- Conocer y comprender los límites de la Física Clásica y las bases experimentales de la Física Cuántica.
- Entender los conceptos fundamentales en la descripción de los fenómenos cuánticos: la cuantificación de la energía, la dualidad onda-corpúsculo, las reglas de cuantificación, la medida de observables cuánticos y las relaciones de incertidumbre.
- Manejo de las unidades típicas de la escala atómica (eV, Angstroms, ... etc).
- Adquirir el concepto de función de onda y su interpretación probabilística.
- Conocer como calcular los valores posibles de la medida de un observable cuántico así como las probabilidades relativas de los diferentes resultados y su valor medio.
- Saber describir los sistemas cuánticos mediante el planteamiento correcto de la ecuación de Schrödinger correspondiente.
- Ser capaz de resolver la ecuación de Schrödinger para problemas unidimensionales. Específicamente, saber calcular los coeficientes de transmisión y reflexión en problemas de dispersión, y la función de onda y los niveles energéticos en los problemas de estados ligados.

- Determinar la evolución temporal de un sistema a partir de sus soluciones estacionarias.
- Utilizar las simetrías (paridad, periodicidad, rotaciones) del problema en cuestión para simplificar su solución y entender más profundamente los resultados.

VII.- HABILIDADES TRANSVERSALES

Las competencias y habilidades del Título de Grado en Física asociadas a esta materia son:

- Desarrollar la capacidad de razonamiento crítico y la aplicación del método científico.
- Ser capaz de identificar problemas, incluyendo las semejanzas con otros cuya solución es conocida, e idear estrategias para su solución.
- Desarrollar la capacidad de planificar y organizar el propio aprendizaje, basándose en el trabajo individual, a partir de la bibliografía y otras fuentes de información.
- Evaluar las diferentes causas de un fenómeno y su importancia relativa.
- Identificar los elementos esenciales de una situación compleja, realizar las aproximaciones necesarias para construir modelos simplificados que lo describan y poder así entender su comportamiento en otras situaciones.
- Ser capaz de efectuar una puesta al día de la información existente sobre un problema concreto, ordenarla y analizarla críticamente.
- Fomentar la capacidad para trabajar en equipo a la hora de abordar problemas complejos que requieren colaboración con otras personas.
- Potenciar la adquisición de recursos de expresión oral y escrita para llevar a cabo una argumentación científica clara y coherente.
- Estimular la capacidad de comunicación de los conceptos físicos involucrados en un problema mediante expresión oral y escrita.
- Potenciar la comprensión y el uso de las nuevas tecnologías de la información.

VIII.- TEMARIO Y PLANIFICACIÓN TEMPORAL

La planificación que se muestra a continuación es lógicamente orientativa ya que, dependiendo del ritmo de adquisición de competencias de los alumnos, del grado de madurez de sus conocimientos previos y del criterio del profesor puede resultar conveniente (o necesario) reajustar el cronograma siguiente y el desarrollo de los temas. Las horas que se indican en cada lección corresponden a la previsión de tiempo empleado en las clases teórico-prácticas.

Orden	TEMA	Horas
1	TEMA 1.- <u>Introducción</u> Dominio de la Física Cuántica. Límites de aplicabilidad de la Física Clásica: la constante de Planck. Las constantes fundamentales de la naturaleza.	1

	Unidades naturales	
2	<p>TEMA 2.- <u>Cuantos de energía: el postulado de Planck</u></p> <p>Radiación del cuerpo negro. Postulado de Planck: cuantos de energía. Calor específico de los sólidos: modelos de Einstein y Debye.</p>	3
3	<p>TEMA 3.- <u>Dualidad onda-corpúsculo: fotones</u></p> <p>El efecto fotoeléctrico. Emisión de Rayos X. Efecto Compton. Producción y aniquilación de pares. Dualidad onda-corpúsculo: Principio de indeterminación.</p>	3
4	<p>TEMA 4.- <u>Modelos atómicos: la vieja teoría cuántica</u></p> <p>Espectros atómicos. El átomo de Rutherford. El modelo atómico de Bohr. Principio de Correspondencia. Experiencia de Franck-Hertz. Reglas de cuantización generalizadas.</p>	3
5	<p>TEMA 5.- <u>Dualidad onda-corpúsculo para la materia</u></p> <p>Dualidad onda-corpúsculo de la materia: Postulado de De Broglie. Experimento de Davisson-Germer. Paquetes de onda.</p>	3
6	<p>TEMA 6.- <u>Mecánica cuántica.</u></p> <p>Introducción. La mecánica cuántica de Heisenberg y de Schrödinger. Ecuación de Schrödinger. Interpretación de Born de la función de onda. Ecuación de continuidad: conservación de la probabilidad. Estados estacionarios. Superposición de estados estacionarios.</p>	4
7	<p>TEMA 7.- <u>Distribuciones de probabilidad</u></p> <p>Introducción. Magnitudes dinámicas en Física Cuántica. Observables y probabilidades generalizadas. Operadores hermíticos. Matrices transpuestas y conjugadas hermíticas.</p>	3

8	<p>TEMA 8.- <u>Valores esperados e incertidumbres</u></p> <p>Introducción. Valor medio o valor esperado. El límite clásico: Teoremas de Ehrenfest. La incertidumbre cuántica. Relaciones de incertidumbre generalizadas. Relación de incertidumbre energía-tiempo. Anchura natural de los niveles energéticos.</p>	4
9	<p>TEMA 9.- <u>Problemas unidimensionales</u></p> <p>Movimiento clásico en una dimensión. Propiedades de las funciones propias del hamiltoniano. Soluciones para un potencial constante. Escalón de potencial. Evolución temporal.</p>	5
10	<p>TEMA 10.- <u>Dispersión por barreras y pozos</u></p> <p>Penetración de barreras: Efecto Túnel. Emisión de partículas α por núcleos. Fusión termonuclear. Corriente de electrones en metales: fórmula de Fowler-Nordheim. El microscopio de efecto túnel. Transmisión por barreras. Transmisión por pozos: Efecto Ramsauer-Townsend.</p>	5
11	<p>TEMA 10.- <u>Estados ligados</u></p> <p>Potencial delta de Dirac. Pozo cuadrado: energías discretas (estados ligados). Pozo cuadrado infinito. Paridad. Polos de la amplitud de transmisión. Resonancias de transmisión.</p>	5
12	<p>TEMA 12.- <u>El oscilador armónico</u></p> <p>Estados estacionarios. Polinomios de Hermite y valores permitidos de la energía. Mecánica matricial: operadores creación-destrucción. Probabilidad clásica y cuántica. Teorema del Virial. Energía de vibración de moléculas diatómicas. Funciones de onda en Mecánica matricial.</p>	6

IX.- BIBLIOGRAFIA DE REFERENCIA

a) Bibliografía básica:

1. S. Gasiorowicz, *Quantum Physics*, Ed. John Wiley & Sons Inc.
2. R. Eisberg y R. Resnick, *Física Cuántica (átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas)*, Ed. Limusa.
3. D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, Ed. Pearson- Prentice-Hall.
4. Carlos Sánchez del Río et al., *Física Cuántica I y II*, Ed. Eudema Universidad.
5. R. P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics III*, Ed. Addison-Wesley.
6. P. A. Tipler, *Física Moderna*, Ed. Reverté S.A.
7. Jean-Marc Lévy-Leblond y F. Balibar, *Quantics: Rudiments of Quantum Physics*, Ed. North-Holland.

b) Bibliografía complementaria:

1. Alastair I. M. Rae, *Quantum Mechanics*, 3rd Edition, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia (1993).
2. Alberto Galindo y Pedro Pascual, *Mecánica Cuántica*, Alhambra.
3. J. J. Brehm y W. J. Mullin. *Introduction to the structure of matter: A Course in Modern Physics*, Ed. J. Wiley and Sons (1989).
4. A. Beiser, *Concepts of Modern Physics*, 6th Edition, Ed. McGraw-Hill (2002).
5. K. Krane, *Modern Physics*, Ed. J. Wiley and Sons (1996).
6. P. Atkins y R. Friedman, *Molecular Quantum Mechanics*, 4th edition, Oxford University Press (1999).
7. Y. Peleg, R. Pnini y E. Zaarur, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill (1998).
8. R. F. Alvarez-Estrada y J. L. Sánchez Gómez, *100 Problemas de Física Cuántica*, Alianza Editorial (1996).

c) Otro material complementario:

1. Aula virtual.

X.- CONOCIMIENTOS PREVIOS

Los conocimientos previos necesarios para el desarrollo de la asignatura los desglosaremos en dos grupos:

- **Conocimientos matemáticos:**

1. Espacios vectoriales.
2. Productos internos: espacios vectoriales euclídeos.

3. Operadores lineales: hermíticos y unitarios.
4. Matrices y determinantes.
5. Diagonalización de operadores lineales y matrices.
6. Transformadas de Fourier.
7. Delta de Dirac.
8. Solución de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes.
9. Solución de ecuaciones diferenciales mediante serie de potencias.
10. Ecuación diferencial de Hermite.
11. Nociones de probabilidad y estadística.

• **Conocimientos físicos:**

1. Dimensiones de las magnitudes físicas y unidades.
2. Mecánica Lagrangiana: construcción del lagrangiano y ecuaciones de Lagrange.
3. Mecánica Hamiltoniana: construcción del Hamiltoniano y ecuaciones de Hamilton.
4. Movimiento oscilatorio: el oscilador armónico clásico.
5. Movimiento ondulatorio: ecuación de ondas, difracción e interferencia.
6. Campos eléctricos y magnéticos: radiación electromagnética.
7. Partícula cargada clásica en un campo electromagnético.
8. Sistema clásico de dos partículas: centro de masas.
9. Momento angular clásico.
10. Descripción microscópica de las ecuaciones de estado termodinámicas.
11. Distribución de Boltzman.
12. Principio de equipartición.
13. Fórmula de Boltzmann para la entropía.

XI.- METODOLOGÍA

La asignatura constará de dos tipos de clases con metodología diferenciada:

a) Clases teórico-prácticas (3 h por semana)

En las clases teórico-prácticas se impartirán los contenidos teóricos básicos de la asignatura, así como ejemplos prácticos y ejercicios que mejor los ilustren. Se hará especial hincapié en la aplicación de los conocimientos teóricos a la solución de cuestiones y problemas. Se resolverán sistemas físicos sencillos como ejemplo de los métodos teóricos generales estudiados y se compararán los resultados con los datos experimentales. Aunque la mayor parte de los aspectos del programa se abordarán directamente en estas clases, algunos aspectos puntuales o monográficos del temario podrán ser indicados para su estudio sin que se traten directamente. De hecho, se fomentará y guiará al alumno en la ampliación de estos contenidos a través de la bibliografía recomendada, así como la posibilidad de ampliación de conocimientos en asignaturas futuras.

b) Tutorías grupales (1 h cada semana)

En estas clases de problemas en grupos reducidos se pondrá a disposición de los estudiantes un boletín con problemas y ejercicios que se irán programando para que sean resueltos por los

estudiantes antes de cada una de las clases. En ellas los estudiantes deberán resolver y explicar públicamente los problemas, justificando adecuadamente los cálculos realizados y plantear las dudas que hayan surgido o los aspectos que presentan dificultades conceptuales o de cálculo. Los profesores harán un seguimiento del trabajo y progreso de los estudiantes, además de resolver las dudas planteadas. Durante el desarrollo de las propias sesiones también se podrán asignar ejercicios básicos que faciliten la comprensión de los fundamentos de la materia.

XII.- EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE

Los sistemas de evaluación son los siguientes:

- 1) Exámenes escritos: una parte evaluará la comprensión de los aspectos teórico-conceptuales y el formalismo de la materia, tanto mediante preguntas teóricas como a través de cuestiones conceptuales y numéricas o casos particulares sencillos. Otra parte valorará la capacidad de aplicación del formalismo, mediante la resolución de problemas, así como la capacidad crítica respecto a los resultados obtenidos. En ambas partes se valorarán una correcta argumentación y una adecuada justificación.
- 2) Evaluación continua: valoración de trabajos y problemas presentados por los estudiantes, cuestiones propuestas y discutidas en el aula, presentación oral de problemas resueltos o cualquier otro método que suponga una interacción entre docentes y estudiantes.

OBSERVACIONES: Siempre que se cumplan los criterios de compensación que se establezcan a tal efecto, la nota de esta asignatura se podrá promediar con la/s otra/s correspondiente/s a la misma materia de forma que se dé ésta por superada.