Identificación de la asignatura

Nombre	21022 - Física Cuántica
Créditos	2,4 presenciales (60 horas) 3,6 no presenciales (90 horas) 6 totales (150 horas).
Grupo	Grupo 1, 1S, GFIS (Campus Extens)
Período de impartición	Primer semestre
Idioma de impartición	Castellano

Profesores

Profesor/a	Horario de atención a los alumnos					
	Hora de inicio	**Hora de fin**	**Día**	**Fecha inicial**	**Fecha final**	**Despacho**
María Rosa López Gonzalo rosa.lopez-gonzalo@uib.es	09:00	10:00	Lunes	15/09/2017	31/07/2018	208
Miguel Ambrosio Sierra Seco de Herrera	Hay que concertar cita previa con el/la profesor/a para hacer una tutoría					

Contextualización

La física cuántica es una disciplina fundamental dentro del amplio campo de la física. Es evidente el papel básico que desempeña en la descripción de los procesos atómicos, moleculares y nucleares, aunque su rango de aplicación no se restringe sólo a los sistemas microscópicos. Por ejemplo, fenómenos colectivos que se producen a escala macroscópica como la superconductividad o el magnetismo se pueden entender sólo desde una aproximación cuántica. En la actualidad la física cuántica ha revolucionado los sistemas de computación, estando cada día más cerca la posibilidad de construir ordenadores cuánticos potentes y muy seguros, y ha irrumpido con fuerza en la caracterización precisa de nanoestructuras con un alto grado de funcionalidad a escalas por debajo de la micra.

Por todo ello, el estudiante del Grado de Física debe adquirir un conocimiento suficiente, si bien forzosamente introductorio, de los principios y métodos de la teoría cuántica. Aunque se ha ofrecido un primer acercamiento durante la asignatura "Física General II", éste ha consistido sólo en una exposición fenomenológica de las ideas principales. Así pues, es en la presente asignatura donde el estudiante, suficientemente familiarizado ya con herramientas matemáticas indispensables, se enfrenta al estudio serio y pormenorizado del formalismo general y de los sistemas físicos más relevantes cuyas propiedades explica la teoría cuántica con espectacular precisión.

"Física Cuántica" es una asignatura de 6 ECTS de la materia "Física Cuántica". Se trata de una asignatura obligatoria dentro de la titulación del Grado de Física, impartiéndose durante el primer semestre del tercer curso. La otra asignatura de la materia es "Mecánica Cuántica", del segundo semestre. Las dos aportan conocimientos necesarios para asignaturas de cuarto año.

Requisitos

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

Recomendables

Se recomienda estar cursando o haber cursado las asignaturas siguientes: Matemáticas II, Ecuaciones Diferenciales II, Espacios de Funciones, Variable Compleja y Mecánica Analítica.

Competencias

Nuestro objetivo es que el estudiante asimile los fundamentos teóricos (matemáticos y físicos) de la Física Cuántica y empiece a conocer los sistemas microscópicos (átomos, moléculas y núcleos) que es capaz de describir. Un objetivo más ambicioso es que el alumno vaya desarrollando una nueva intuición cuántica que empieza a gestarse cuando intenta resolver muchos problemas y reflexiona sobre los fundamentos físicos de la teoría.

Dado que el programa es extenso y sería imposible detenerse a demostrar rigurosamente cada resultado, haremos hincapié en el significado físico de ciertos efectos característicos más que en explorar exhaustivamente todas las posibilidades.

Específicamente, el alumno debe acabar la asignatura habiendo adquirido los siguientes conocimientos y destrezas:

* Conocer las bases experimentales de la Física Cuántica.
* Conocer el carácter onda-cospúsculo de los fenómenos microscópicos.
* Adquirir los conceptos de función de onda y las bases de la descripción de los fenómenos cuánticos mediante la ecuación de Schrödinger.
* Resolver la ecuación de Schrödinger para problemas unidimensionales y ser capaz de calcular el efecto túnel en diversos sistemas físicos.
* Comprender el significado del operador momento angular en Física Cuántica.
* Resolver problemas tridimensionales, en particular los invariantes bajo rotaciones (átomo de hidrógeno, oscilador armónico).
* Manejar con soltura las unidades típicas de la escala atómica (electrón-voltios, Angstroms, magnetón de Bohr).
* Entender el comportamiento de las partículas idénticas.
* Comprender los fundamentos de la teoría cuántica de colisiones y aplicarla a problemas sencillos.

Específicas

* Se trabajarán las competencias específicas E1 (ser capaz de evaluar órdenes de magnitud), E2 (comprender lo esencial de un proceso físico), E3 (comprensión de las teorías físicas), E4 (saber usar modelos matemáticos y aproximaciones) y E5 (comparar críticamente los resultados de un cálculo con las observaciones experimentales)..

Genéricas

* Se trabajarán las competencias básicas B1(demostrar poseer y comprender conocimientos de Física avanzada, incluyendo aspectos de la vanguardia en Física), B2 (saber aplicar esos conocimientos a la defensa, argumentación y resolución de problemas de Física) y B3 (tener la capacidad de reunir datos relevantes del área de la Física para emitir juicios de índole social o científica), además de la competencia transversal T1 (capacidad de análisis y síntesis)..

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

Básicas

* Se pueden consultar las competencias básicas que el estudiante tiene que haber adquirido al finalizar el grado en la siguiente dirección: http://estudis.uib.cat/es/grau/comp_basiques/

Contenidos

El curso consta de seis temas bastante desiguales en cuanto a su extensión. El tema 1 será una introducción muy breve a los experimentos y contradicciones teóricas que dieron lugar al nacimiento de la teoría cuántica. El tema 2 introducirá de una forma fenomenológica la ecuación fundamental de la Mecánica Cuántica y se esbozará los conceptos más relevantes y las consecuencias más revolucionarias de la teoría. En el tema 3 se estudiarán con detalle ciertos sistemas que constituyen casos paradigmáticos de la ecuación de Schroedinger en 1 dimensión. El tema 4 es el más largo y el más importante de todo el curso. Se expondrá el formalismo general de la teoría cuántica de forma meticulosa poniendo especial cuidado en que la parte matemática no oscurezca el significado físico de las ecuaciones. En el tema 5 se dará un salto cualitativo al analizar sistemas reales en dos y tres dimensiones (superficies y átomos). Finalmente, el tema 6 está pensado como una introducción a las ideas más básicas de la teoría de colisiones (*scattering*) en el régimen cuántico.

Contenidos temáticos

Tema 1. Necesidad y base experimental de la Física Cuántica

Este tema presenta una introducción a los experimentos e ideas claves que dieron lugar al desarrollo de la física cuántica. Se abordan los antecedentes históricos como la hipótesis de Planck de la cuantización de la energía que sirvió para la explicación de la línea espectral de un cuerpo negro y para la posterior comprensión del efecto fotoeléctrico. De la misma forma que las ondas electromagnéticas pueden comportarse como partículas (los denominados "fotones"), las partículas masivas, como los electrones, tienen características ondulatorias y dan lugar a fenómenos de interferencia y difracción. Discutiremos el efecto Compton y la difracción electrónica por redes cristalinas.

* **Radiación de cuerpo negro.** Se analiza la crisis a la que llegó la física clásica a fines del s. XIX por medio de un ejemplo importante: la radiación emitida por un cuerpo negro. Clásicamente, el cálculo de los modos electromagnéticos de una cavidad da lugar a una densidad de energía de radiación que diverge a frecuencias altas (ley de Rayleigh-Jeans). La hipótesis de Planck sobre la cuantización de la energía de radiación en forma de fotones, postulando una nueva constante física, h, reproduce la ley de Rayleigh-Jeans a bajas frecuencias, cuando los fotones se comportan como ondas, y da un resultado finito a altas frecuencias (ley de Wien) que coincide con el experimento. Es a altas energías cuando el carácter corpuscular de la luz se vuelve evidente.
* **Efecto fotoeléctrico.** La hipótesis de Planck fue utilizada por Einstein en su modelo del efecto fotoeléctrico. Se explicará que la radiación ultravioleta es capaz de arrancar electrones de la superficie de electrodos metálicos y que la energía cinética de estos fotoelectrones emitidos sigue una ley de proporcionalidad lineal con la frecuencia de la radiación, independientemente de la intensidad de la misma.
* **Efecto Compton**. Puesto que la luz se compone de partículas (fotones), éstas pueden llevar momento y transferirlo a un electrón con el que colisione. A partir de la variación angular la luz dispersada se puede definir la longitud de onda Compton del electrón.
* **Difracción electrónica. Longitud de onda de de Broglie.** El segundo ejemplo de la dualidad onda-corpúsculo, quizá más espectacular que el anterior, se expone aquí. De Broglie postuló la existencia de ondas asociadas a partículas materiales. Esta predicción se confirmó en el

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

experimento de Davisson y Germer en el que un haz de electrones era difractado, como una onda, por un sólido cristalino.

Tema 2. La función de onda

Este tema tiene como propósito el introducir cualitativamente los conceptos más importantes que se desarrollarán a lo largo del curso. Se destacan las diferencias entre la Mecánica Clásica y la Cuántica y cómo la introducción de la idea de función de onda nos obliga a manejar una interpretación probabilística de la teoría. Distinguiremos entre la evolución dinámica suave que marca la ecuación de Schrödinger y la abrupta que se deriva del colapso de la función de onda. Avanzaremos los conceptos de colectividades y operadores, y acabaremos con una breve exposición del principio de incertidumbre.

* **Trayectorias clásicas frente a funciones de onda. Segunda Ley de Newton frente a la Ecuación de Schrödinger.** Mientras que en Mecánica Clásica la trayectoria de una partícula está completamente determinada, en principio, por la Segunda Ley de Newton, en Física Cuántica la idea de trayectoria es sustituida por la de función de onda, que obedece una ecuación en derivadas parciales llamada ecuación de Schrödinger.
* **Interpretación estadística de Born. Densidad de probabilidad. Colapso de la función de onda.** El módulo al cuadrado de la función de onda representa una densidad de probabilidad tal que la probabilidad de hallar una partícula en un intervalo espacial dado y en un tiempo determinado está dada por la integral de la densidad de probabilidad a lo largo de ese intervalo espacial. Subrayaremos que, a nivel microscópico, el resultado de un experimento no puede predecirse con exactitud sino que sólo es posible dar información estadística. Finalmente, adelantaremos el concepto de "colapso" de la función de onda cuando medimos la posición de una partícula.
* **Repaso de probabilidad. Valor esperado. Incertidumbre.** Repasaremos las propiedades más importantes de las densidades de probabilidad y las definiciones de valor esperado (valor medio) e incertidumbre (varianza). De entre todas las distribuciones destacaremos, por su relevancia en capítulos posteriores, la gaussiana.
* **Normalización. Funciones cuadrado integrables. Conservación de la corriente (flujo) de probabilidad.** La normalización es una restricción que se impone a las posibles soluciones de la ecuación de Schrödinger y que está motivada por una razón de tipo físico. Demostraremos que dicha normalización se conserva al evolucionar el sistema con el tiempo y aprovecharemos para introducir la corriente (o flujo) de densidad de probabilidad.
* **Operadores de posición y momento. Variables dinámicas.** Los primeros ejemplos de observables serán los operadores de posición y momento. Explicaremos cómo el valor esperado de la posición puede entenderse dentro de una colectividad de partículas, todas preparadas en el mismo estado cuántico. Deduciremos la forma que debe tener el operador momento y daremos ejemplos con funciones de onda concretas. Finalmente, investigaremos las ecuaciones de movimiento de los valores esperados de la posición y el momento (teorema de Ehrenfest) y discutiremos el límite clásico de forma cualitativa.

Tema 3. Ecuación de Schrödinger estacionaria

El objetivo de este tema es resolver la ecuación de Schrödinger en problemas unidimensionales sencillos que ilustren los conceptos expuestos en el tema anterior. Así, se comienza con el cálculo de los niveles energéticos en un pozo infinito y en un potencial parabólico. El segundo caso es particularmente destacable, pues es la primera vez que los estudiantes se enfrentarán al formalismo de operadores de creación y destrucción, indispensable en la teoría cuántica de campos. Luego, expondremos el caso de la partícula libre, cuya función de onda no es normalizable a menos que incorporemos la idea de "paquete de onda". Finalmente, abordamos un problema de dispersión (*scattering*) que contiene mucha física y que es de capital importancia para entender una gran variedad de fenómenos: la dispersión por una barrera de potencial dando lugar al efecto túnel.

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

* **Separación de variables. Estados estacionarios. Principio de superposición.** Si el potencial externo *V(x)* no depende del tiempo, la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo puede resolverse, al menos formalmente, postulando soluciones que sean producto de funciones que dependan separadamente de la posición *x* y el tiempo *t*. Así, la ecuación en derivadas parciales se transforma en dos ecuaciones diferenciales ordinarias. Dichos estados separables se denominan "estacionarios" ya que su densidad de probabilidad es independiente del tiempo. Una vez resuelta la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo como un problema de autovalores, la solución más general de la ecuación dependiente del tiempo se construye mediante una combinación lineal de estados separables (principio de superposición).
* **Pozo cuadrado infinito. Niveles discretos. Paridad de las autofunciones.** La ecuación de Schrödinger en una dimensión con condiciones de contorno puede resolverse analíticamente cuando el potencial al que está sometida la partícula tiene una forma sencilla. El ejemplo más característico es el pozo de potencial con paredes duras donde la función de onda se anula. Demostramos que la energía está cuantizada y estudiamos las propiedades de los autoestados bajo inversión de la coordenada espacial.
* **Oscilador armónico. Método algebraico. Operadores escalera. Relación de conmutación canónica. Método analítico.** Introduciremos los operadores escalera, que suben o bajan el índice (número de cuantos) correspondiente al estado. Estos operadores surgen de una combinación de los operadores de posición y de momento de tal forma que el hamiltoniano es diagonal cuando se reescribe con ellos. Presentaremos muchos ejercicios, haciendo hincapié en la resolución de los mismos para que el estudiante se familiarice con el álgebra de operadores de campo. Finalmente, notaremos que los estados estacionarios tienen una dependencia gaussiana con la coordenada espacial, anulándose asintóticamente. La ecuación de onda resultante se resuelve con polinomios de Hermite y el espectro aparece cuantizado.
* **Partícula libre. Espectro continuo. Ondas planas. Paquetes de ondas. Relación de dispersión.** Introduciremos las ondas planas como soluciones propagantes de la ecuación de Schrödinger cuando *V=0*. Señalaremos la necesidad de considerar paquetes de onda donde la energía no está perfectamente definida al tener en cuenta una superposición infinita de armónicos (transformada de Fourier).
* **Potencial delta de Dirac. Estados ligados y estados de *scattering*.** El potencial delta de Dirac permite distinguir entre dos tipos de estados: normalizables (ligados) y no normalizables (de *scattering*). En efecto, cuando el potencial es atractivo se demostrará que existe un único estado ligado con energía negativa mientras que el problema de enegías positivas se resuelve calculando las probabilidades de transmisión y reflexión.
* **Pozo cuadrado finito. Espectro discreto y continuo. Cálculo de estados ligados por el método de *matching*. Determinación de los coeficientes de transmisión y reflexión. Efecto túnel.** El espectro del pozo cuadrado finito es de naturaleza mixta, pues, en general, pueden encontrarse estados ligados y estados de *scattering*. Es importante que el estudiante aprenda a calcular estados ligados mediante el método de *matching*, es decir, imponiendo condiciones adecuadas en los puntos frontera donde varía apreciablemente el potencial. Por otra parte, la penetración en zonas de potencial clásicamente prohibidas se pone de manifiesto de forma llamativa durante el efecto túnel. Consideramos un problema de dispersión sencillo en el que las condiciones de contorno son no triviales y hace falta discutirlas con cuidado. Veremos que cuando la energía de la partícula incidente sobre una barrera de potencial es inferior a la altura de la barrera, existe una probabilidad de transmisión al otro lado. Resolveremos exactamente el caso de una barrera cuadrada. Si queda tiempo, mostraremos el comportamiento cualitativo de una doble barrera túnel ya que es la base del dispositivo de efecto túnel resonante y constituye el ejemplo más sencillo de un nivel resonante que adquiere una vida media.

Tema 4. Formalismo

Este tema es el más importante de la asignatura y al que más tiempo vamos a dedicar. Primero, estableceremos los postulados de la mecánica cuántica desarrollando sus implicaciones físicas. Profundizaremos en la interpretación probabilística de la función de onda y en el proceso de

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

medida. Se introduce inmediatamente la notación de Dirac para el espacio de estados en forma de vectores *kets* y *bras*. Creemos que es crucial que el alumno se familiarice rápido en la notación de Dirac ya que hay propiedades cuánticas, como el espín, que no pueden describirse en términos de funciones de onda convencionales. Luego, introducimos los operadores lineales y enfatizaremos la importancia de los operadores hermíticos. Después, trabajaremos con cambios de base y finalizaremos el tema estudiando en profundidad los espacios de Hilbert asociados a funciones de onda en los espacios de posición y momento. Entonces, expondremos las propiedades más importantes de la ecuación de Schrödinger y nos concentraremos en el estudio de los sistemas conservativos para los cuales los estados estacionarios desempeñan un papel relevante. Aunque hasta este momento nos hemos concentrado en las propiedades de estados de una sola partícula, cuando se tiene en cuenta la identidad de las partículas cuánticamente surgen efectos sorprendentes que trataremos de resumir brevemente al final de este tema.

* **Espacio de Hilbert. Notación de Dirac. Kets y bras.** Se repasa brevemente el concepto de "espacio de Hilbert" como espacio vectorial con vectores de estado normalizables. A continuación, definimos el espacio dual y discutimos la correspondencia entre *kets* y *bras*. Se explica la notación de Dirac para el producto escalar y se demuestra la representación de un estado en un base dada.
* **Operadores. Cálculo del hermítico conjugado. Observables. Propiedades de operadores hermíticos.** Se exponen las propiedades de los operadores lineales mediante su actuación en el espacio dual, enlazando con la sección anterior gracias a los operadores de proyección. Revisamos las propiedades más utilizadas de los operadores lineales (traza, función de operadores, álgebra de conmutadores). Posteriormente, proporcionamos la definición de conjugación hermítica y operadores hermíticos.
* **Autofunciones y autovalores. Estados determinados. Espectro. Índice discreto e índice continuo. Relación de cierre. Representación matricial.** Conocer los autovalores de un operador y sus autoestados es indispensable en Física Cuántica ya que van ligados a observables físicos. Se expone la forma de obtener los autoestados y autovalores de un operador dado y se da la definición de un observable y de conjuntos completos de operadores que conmutan. Detallaremos las propiedades más sobresalientes tanto de estados de índice discreto como de índice continuo, remarcándose la utilidad de la relación de cierre como elemento característico de una base completa.
* **Representación en los espacios de posición y de momento.** Las representaciones de posición y de momento son dos ejemplos muy importantes. Como quiera que las bases correspondientes son continuas, utilizamos la delta de Dirac y la relación de cierre en forma integral. Después, damos la representación de los operadores de posición y momento y cómo pasar de una a otra, calculando sus autofunciones (deltas y ondas planas) y señalando la conocida relación de anticonmutación entre posición y momento.
* **Interpretración estadística generalizada.** Estudiaremos los posibles resultados de la medida de un observable dado y analizaremos mediante la interpretación estadística de la Física Cuántica, la forma de calcular la probabilidad de que se observe un valor concreto. Examineremos asimismo cómo se transforma abruptamente la función de onda tras interaccionar el sistema y el observador (principio de reducción de estado o colapso de la función de onda).
* **Evolución temporal. Operador unitario. Sistemas conservativos. Representación de Heisenberg.** La ecuación de Schrödinger proporciona la evolución dinámica de la función de onda conocido el operador hamiltoniano H del sistema. Damos ejemplos importantes de la forma de la ecuación (partícula libre, potential escalar y campo magnético), fijándonos en un caso especialmente relevante: los sistemas conservativos, para los cuales H no depende del tiempo. Introducimos el operador unitario de evolución temporal y discutimos sus propiedades. Después, demostramos cómo pasar la dependencia explícita con el tiempo de la función de onda (representación de Schrödinger) a los operadores (representación de

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

Heisenberg). Se establece la ecuación de movimiento para los operadores y se relaciona con las cantidades conservadas (buenos números cuánticos).

* **Principio de incertidumbre generalizado. Observadores incompatibles. Conjunto completo de operadores que conmutan (CCOC).** Comentamos la generalidad de las relaciones de indeterminación para dos operadores conjugados cualesquiera. Definiremos observadores incompatibles en contraposición a un conjunto de operadores que comparten un mismo grupo de autofunciones y que, por tanto, pueden medirse simultáneamente sin alterar el estado del sistema.
* **Principio de incertidumbre energía-tiempo. Cantidades conservadas. Estados inestables.** Se llamará la atención sobre el hecho de que el principio de incertidumbre energía-tiempo involucra dos cantidades heterogéneas, pues el tiempo desempeña el papel de un parámetro, no de un observable físico. De ahí que deba explicarse con claridad el valor preciso de la variable temporal en esta modalidad del principio de indeterminación. Para ello, deduciremos la ecuación dinámica del valor esperado de un observable cualquiera y mostraremos cuándo dicho observable es una cantidad conservada. Ilustraremos el principio anterior con un estudio somero de los estados inestables.
* **Partículas idénticas. Bosones y fermiones. Principio de exclusión de Pauli. Principio de simetrización.** En Física Cuántica no es posible asociar una etiqueta a una partícula que pertenezca a un sistema de partículas indistinguibles. En primer lugar, investigaremos la simetría de permutación de un estado de dos partículas y veremos que hay estados totalmente simétricos y totalmente antisimétricos. Después, se demostrará que las partículas que obedecen la estadística de Bose-Einstein están descritas por funciones de onda totalmente simétricas mientras que los estados correspondientes a partículas que siguen la estadística de Fermi-Dirac son totalmente antisimétricos.

Tema 5. Mecánica cuántica en dos y tres dimensiones

La extensión del formalismo tratado arriba es inmediata a dos y tres dimensiones, pero la complicación técnica aumenta. Además, aparecen nuevas propiedades, como la degeneración y la posibilidad de autoestados complejos, que antes, en una dimensión, eran bastante exóticas. Primero, estudiaremos la ecuación de Schrödinger en dos dimensiones (coordenadas polares), avanzando el concepto de momento angular utilizando un modelo simple del rotor rígido. El acoplamiento con campos magnéticos puede introducirse en este momento, permitiendo la discusión de efectos tan interesantes como la interferencia de Aharonov-Bohm y la formación de niveles de Landau. La transición a tres dimensiones se efectúa expresando la ecuación de Schrödinger en coordenadas esféricas, lo que nos obligará a analizar las soluciones angulares en forma de armónicos esféricos. Armados con este bagaje teórico, nos prepararemos entonces a examinar un sistema físico de gran relevancia: el átomo de hidrógeno, del cual examinaremos en detalle su espectro energético y sus autoestados. Naturalmente, dejaremos para el futuro aspectos relacionados con la interacción electrónica y correcciones relativistas, que están fuera del alcance del presente curso. Finalmente, acabaremos este tema explicando las propiedades más notables del momento angular orbital cuántico.

* **Ecuación de Schrödinger en varias variables. Degeneración.** En este capítulo simplemente extenderemos la ecuación de Schrödinger en coordenadas cartesianas a más de una dimensión y subrayaremos la necesidad de considerar operadores vectoriales como la posición y el momento, especificando las relaciones de conmutación entre las distintas componentes. Haremos una introducción a los distintos tipos de degeneración que pueden aparecer mediante un ejemplo sencillo: el pozo cuántico en dos dimensiones.
* **Ecuación de Schrödinger en coordenadas polares. Rotor rígido.** En dos dimensiones y cuando la partícula está restringida a moverse en círculo de radio fijo, la función de onda depende sólo de la variable angular, con lo cual podremos definir el operador momento angular a lo largo de la dirección perpendicular al plano de movimiento. Veremos la extensión del teorema de Ehrenfest a movimientos orbitales.

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

* **Interacción con campos eléctricos y magnéticos. Efecto de Aharanov-Bohm. Niveles de Landau.** Repasaremos la formulación hamiltoniana de una partícula cargada en presencia de campos eléctricos y magnéticos y, a partir de ahí, estudiaremos el hamiltoniano cuántico correspondiente. Su característica más notable es la dependencia con el potencial vector, lo que da lugar a efectos tan sorprendentes como la interferencia ondulatoria entre caminos que encierran un flujo magnético no nulo. Finalizaremos esta sección con un análisis de los niveles energéticos de un electrón en un plano bidimensional en presencia de un campo magnético perpendicular.
* **Ecuación de Schrödinger en coordenadas esféricas. Armónicos esféricos. Números cuánticos azimutal y magnético. Ecuación radial.** En problemas de simetría esférica (potenciales centrales) es conveniente expresar la ecuación de Schrödinger en coordenadas esféricas y los estados en productos de funciones radiales y funciones angulares. Éstas últimas se denominan "armónicos esféricos" y enumeraremos sus principales propiedades.
* **Átomo de hidrógeno. Sistema reducido. Autoestados y autoenergías. Capas y subcapas. Espectro del hidrógeno.** Demostramos que la ecuación de Schrödinger para átomos hidrogenoides se reduce a considerar una partícula con coordenada relativa entre el núcleo y el electrón y de masa igual a la masa reducida de los dos componentes. Resolveremos la ecuación radial y discutiremos los distintos números cuánticos asociados a cada estado. Comentaremos la notación espectroscópica y las líneas espectrales asociadas a las transiciones desde niveles superiores.
* **Momento angular. Método algebraico.** Demostramos que en tres dimensiones las tres componentes del momento angular total ***L*** siguen reglas de conmutación especiales, pero que ***L*** ^2 conmuta con cualquiera de ellas. Construimos las autofunciones comunes a ***L*** ^2 y a la tercera componente del momento angular, para lo cual necesitaremos precisamente los armónicos esféricos. Demostraremos que *H* y la tercera componente del momento angular conmutan, por lo que pueden obtenerse la base de autokets comunes así como las energías asociadas.

Tema 6. Estados no ligados y problemas de difusión

La teoría de colisiones es fundamental para entender los experimentos de *scattering* en los que se basa la espectroscopía moderna de física atómica y nuclear. También resulta muy útil en problemas de transporte cuántico en sistemas mesoscópicos. De ahí que empecemos este tema con una definición de la sección eficaz, la magnitud central en procesos de difusión. Después, introduciremos la teoría cuántica de *scattering* mediante dos métodos ampliamente utilizados: el análisis basado en ondas parciales y desfasajes, útil cuando la colisión se produce a bajas energías, y el formalismo de la serie de Born, que es válido para un rango amplio de energías, pero que, en la práctica, se reduce a una serie perturbativa cuyo parámetro de expansión es la intensidad del potencial de *scattering*.

* **Sección eficaz. Amplitud de *scattering*.** La sección eficaz mide clásicamente el número de partículas dispersadas por un centro difusor por unidad de área y unidad de ángulo sólido. Demostraremos que la sección eficaz cuántica se reduce asintóticamente a calcular la amplitud de *scattering*.
* **Análisis basado en ondas parciales. Desfasajes. Matriz de *scattering* .** Cuando el potencial es central, se puede hacer una descomposición de la función de onda en términos de amplitudes de ondas parciales descritas por el número cuántico *l*. Entonces, la teoría puede reformularse en forma de desfasajes, que son más fáciles de interpretar físicamente.
* **Ecuación de Lippman-Schwinger. Serie de Born.** El objetivo de esta sección es calcular la forma integral de la ecuación de Schrödinger. Esta expresión resulta apta para encontrar soluciones en forma de expansión, pues el orden cero representa una onda plana que no interactúa con el potencial de *scattering*. Luego, emplearemos la aproximación de Born, que supone que el potencial es débil y sólo produce una transferencia de momento, pero

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

no un cambio sustancial en la función de onda. Finalmente, determinaremos la amplitud de *scattering* para distintos potenciales físicamente relevantes.

Metodología docente

La metodología docente debe contemplar tanto las actividades de trabajo presencial como las de trabajo no presencial. Dentro de cada una ellas especificamos a continuación las modalidades que proponemos:

Actividades de trabajo presencial

Modalidad	Nombre	Tip. agr.	Descripción	Horas
Clases teóricas	Clases teóricas	Grupo grande (G)	Exposición de los contenidos teóricos del curso mediante lecciones magistrales. Se hará especial énfasis en la ilustración de los principios generales de la teoría cuántica mediante ejemplos característicos.	41
Clases prácticas	Resolución de problemas	Grupo grande (G)	Resolución de problemas por parte del profesor	15
Evaluación	Prueba escrita	Grupo grande (G)	Primera prueba de control de la asignatura. Se realizará una prueba de respuesta larga en la que se valorará la comprensión de los conceptos adquiridos en clase y puestos en práctica en las clases de problemas. La prueba consiste en una serie de preguntas teóricas además de la resolución de una serie de problemas. Se valorará el planteamiento de los problemas, su resolución y la discusión de los resultados obtenidos.	2
Evaluación	Prueba escrita	Grupo grande (G)	Segunda prueba de control de la asignatura. Se realizará una prueba de respuesta larga en la que se valorará la comprensión de los conceptos adquiridos en clase y puestos en práctica en las clases de problemas. La prueba consiste en una serie de preguntas teóricas además de la resolución de una serie de problemas. Se valorará el planteamiento de los problemas, su resolución y la discusión de los resultados obtenidos.	2

Al inicio del semestre estará a disposición de los estudiantes el cronograma de la asignatura a través de la plataforma UIBdigital. Este cronograma incluirá al menos las fechas en las que se realizarán las pruebas de evaluación continua y las fechas de entrega de los trabajos. Asimismo, el profesor o la profesora informará a los estudiantes si el plan de trabajo de la asignatura se realizará a través del cronograma o mediante otra vía, incluida la plataforma Campus Extens.

Actividades de trabajo no presencial

Modalidad	Nombre	Descripción	Horas
Estudio y trabajo autónomo individual	Problemas	Se trata de entregar un problema propuesto	90

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

Riesgos específicos y medidas de protección

Las actividades de aprendizaje de esta asignatura no conllevan riesgos específicos para la seguridad y salud de los alumnos y, por tanto, no es necesario adoptar medidas de protección especiales.

Evaluación del aprendizaje del estudiante

Se realizarán dos pruebas parciales durante el curso. Estas pruebas son recuperables. Se entregará un problema de desarrollo propuesto por el profesor.

Prueba escrita

Modalidad	Evaluación
Técnica	Pruebas de respuesta larga, de desarrollo **(recuperable)**
Descripción	Primera prueba de control de la asignatura. Se realizará una prueba de respuesta larga en la que se valorará la comprensión de los conceptos adquiridos en clase y puestos en práctica en las clases de problemas. La prueba consiste en una serie de preguntas teóricas además de la resolución de una serie de problemas. Se valorará el planteamiento de los problemas, su resolución y la discusión de los resultados obtenidos.
Criterios de evaluación	

Porcentaje de la calificación final: 45%

Prueba escrita

Modalidad	Evaluación
Técnica	Pruebas de respuesta larga, de desarrollo **(recuperable)**
Descripción	Segunda prueba de control de la asignatura. Se realizará una prueba de respuesta larga en la que se valorará la comprensión de los conceptos adquiridos en clase y puestos en práctica en las clases de problemas. La prueba consiste en una serie de preguntas teóricas además de la resolución de una serie de problemas. Se valorará el planteamiento de los problemas, su resolución y la discusión de los resultados obtenidos.
Criterios de evaluación	

Porcentaje de la calificación final: 45%

Problemas

Modalidad	Estudio y trabajo autónomo individual
Técnica	Pruebas de respuesta larga, de desarrollo **(no recuperable)**
Descripción	Se trata de entregar un problema propuesto
Criterios de evaluación	Se entregará un problema propuesto por el profesor

Porcentaje de la calificación final: 10%

Recursos, bibliografía y documentación complementaria

El curso seguirá el libro de Griffiths (Introduction to Quantum Mechanics) como texto básico, excepto el Tema 1 (necesidad y base experimental de la Física Cuántica). En concreto, es fundamental leer con atención los

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017

capítulos 1, 2, 3, 4 y 11 del libro de Griffiths, además del apartado 5.1, y trabajar los ejemplos y problemas que ahí se proponen. El libro de Cohen-Tannoudji, por su carácter enciclopédico, sirve como una excelente herramienta de consulta no sólo durante este curso sino para toda la carrera.

Otros libros interesantes:

"Quantum Mechanics" (Dover Books on Physics) by Albert Messiah,

"Quantum Mechanics, Third Edition: Non-Relativistic Theory" (Volume 3) 3rd Edition by L. D. Landau (Author), L. M. Lifshitz (Author)

"Modern Quantum Mechanics" , J. J. Sakurai (Autor), San Fu Tuan (Redactor)

Bibliografía básica

1. "Introduction to Quantum Mechanics", David J. Griffiths (Pearson, 2a. ed., 2005).

Bibliografía complementaria

1. "Quantum Mechanics", C. Cohen-Tannoudji, B. Diu y F. Laoe (Wiley, 1977).
2. Modern Quantum Mechanics, J. J. Sakurai (Autor), San Fu Tuan (Redactor)
Editor: Prentice Hall, Idioma: Inglés
ISBN-10: 0201539292
ISBN-13: 978-0201539295
3. Quantum Mechanics: volume 1 Albert Messiah
Editor: North-Holland Publishing Co;
Idioma: Inglés
ISBN-10: 0720400449
ISBN-13: 978-0720400441
Quantum Mechanics: volume Albert Messiah (Autor)
Editor: Elsevier Science & Technology; Edición: Revised. (1 de enero de 1981)
Idioma: Inglés
ISBN-10: 0720400457
ISBN-13: 978-0720400458

Antes de imprimir este documento, considere si es necesario hacerlo. El medio ambiente es cosa de todos.
©2016 Universidad de las Illes Balears. Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). Tel.: +34 - 971 17 30 00. E-07122. CIF: Q0718001A

Documento generado automaticamente a las 1140:00 del 22/12/2017