

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
COORDINACIÓN DE FORMACIÓN BÁSICA  
COORDINACIÓN DE FORMACIÓN PROFESIONAL Y VINCULACIÓN  
PROGRAMA DE UNIDAD DE APRENDIZAJE POR COMPETENCIAS

**I. DATOS DE IDENTIFICACIÓN**

1. Unidad Académica: **Facultad de Ciencias**
2. Programa (s) de estudio: (Técnico, Licenciatura) Física 3. Vigencia del plan: \_\_\_\_\_
4. Nombre de la Unidad de aprendizaje: Mecánica Cuántica 5. Clave: \_\_\_\_\_
6. HC: 6 HL \_\_\_\_\_ HT \_\_\_\_\_ HPC \_\_\_\_\_ HCL \_\_\_\_\_ HE \_\_\_\_\_ CR 12
7. Ciclo Escolar: \_\_\_\_\_ 8. Etapa de formación a la que pertenece: **Disciplinaria**
9. Carácter de la Unidad de aprendizaje: Obligatoria  Optativa \_\_\_\_\_
10. Requisitos para cursar la unidad de aprendizaje: Se recomienda haber cursado las siguientes materias: Física Cuántica, Ecuaciones Diferenciales Ordinarias, Álgebra Lineal y Métodos Matemáticos de la Física.

Formuló: Dr. Jorge Alberto Villavicencio Aguilar

Vo.Bo. \_\_\_\_\_

Fecha: 01 de octubre de 2007

Cargo: \_\_\_\_\_

## II. PROPÓSITO GENERAL DEL CURSO

El curso de *Mecánica Cuántica* es una introducción a la mecánica cuántica no-relativista en donde se discuten el desarrollo de la formulación teórica de la física microscópica, así como sus aplicaciones en sistemas naturales y artificiales. Además de discutir los experimentos que dieron lugar al desarrollo de una nueva teoría más general que la Mecánica Clásica, se presentan los conceptos matemáticos y la construcción formal de la Mecánica Cuántica. Este curso provee las bases para que el alumno pueda introducirse al estudio teórico y experimental de teorías avanzadas como la *Física de la Materia Condensada*, y la *Física de Nanoestructuras*, entre otras. El curso permite que el alumno adquiera una disciplina en la elaboración de modelos y simulación de fenómenos microscópicos, para la solución de problemas en los ámbitos de la investigación, la docencia, la industria y el desarrollo tecnológico. Esto le permitirá al alumno proponer proyectos viables en los ámbitos mencionados, que coadyuven al progreso de nuestro país.

## III. COMPETENCIA (S) DEL CURSO

El estudiante será capaz de explicar diversos procesos físicos naturales y artificiales en el contexto de la Física Microscópica, mediante el desarrollo de habilidades para plantear, analizar y resolver problemas típicos de mecánica cuántica. Al contar con un conocimiento amplio de las propiedades microscópicas de la materia, el estudiante podrá proponer modelos que simulen (o describan) los fenómenos de naturaleza cuántica tanto en la física básica como en la aplicada.

## IV. EVIDENCIA (S) DE DESEMPEÑO

- Exámenes parciales que permitan evaluar la capacidad para aplicar técnicas de solución de problemas típicos de mecánica cuántica que competen a las distintas unidades del curso. Modalidad: escrita.
- Examen trimestral y semestral de opción múltiple que permitan evaluar el grado de asimilación e integración de conceptos. Modalidad: escrita.
- Tareas semanales y exámenes para evaluar la disposición al trabajo, la responsabilidad y el compromiso con el curso. M.E.
- Elaboración de resúmenes en forma individual y por equipo, de artículos de divulgación e investigación relacionados con temas de frontera en el área de la física microscópica, para tener un panorama actualizado del estado del arte de la disciplina. Modalidad:

oral y escrita.

- Utilización de animaciones computacionales y paquetes de resolución numérica para abordar problemas de mecánica cuántica.  
Modalidad: oral y escrita.

## V. DESARROLLO POR UNIDADES

### ***Primera Unidad: Conceptos básicos de la mecánica cuántica***

***Duración: 12 horas***

**Competencia:** Estudiar los problemas físicos fundamentales y los experimentos que culminaron en con el establecimiento de una nueva teoría física para describir el comportamiento de los microsistemas (átomos, cristales, moléculas): la mecánica cuántica. Analizar el concepto de función de onda y su interpretación probabilística. Estudiar las soluciones de la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo para potenciales unidimensionales típicos que involucran potenciales rectangulares (barreras y pozos). Los conocimientos y habilidades adquiridas por el estudiante en la presente unidad, le permitirán explicar el fenómeno de *tunelaje cuántico* a través de una barrera de potencial, fenómeno que constituye uno de los paradigmas de la mecánica cuántica. Su descubrimiento ha conducido a la invención del revolucionario *transistor de estado sólido*, del *microscopio electrónico*, y de una impresionante lista de dispositivos electrónicos de uso actual.

### **Contenido**

1. Ondas electromagnéticas y fotones: cuantos de luz y la relación Planck-Einstein; dualidad onda partícula; el experimento de doble rendija;

el principio de descomposición espectral.

2. Partículas materiales y ondas de materia: relaciones de De Broglie; la función de onda y la ecuación de Schrödinger.
3. Descripción cuántica de una partícula: la partícula libre, evolución temporal de un paquete de onda; relaciones de incertidumbre de Heisenberg; evolución temporal de un paquete libre; evolución del paquete Gaussiano.
4. Partícula en un potencial escalar independiente del tiempo: separación de variables; estados estacionarios; superposición de estados estacionarios; estudio cualitativo y cuantitativo de los potenciales unidimensionales (escalón, barrera y pozo rectangulares); analogía óptica.
5. Estados estacionarios de una partícula en potenciales unidimensionales: escalón, barrera y pozo rectangulares.

## ***Segunda Unidad: Herramientas matemáticas de la mecánica cuántica***

***Duración: 12 horas***

***Competencia:*** Estudiar los conceptos matemáticos básicos utilizados en la mecánica cuántica: espacios de funciones; bases ortonormales; operadores lineales; espacio de estados; eigenvalores y eigenvectores; diagonalización; notación de Dirac.

### **Contenido**

1. Espacio de funciones de onda para una partícula: espacios vectoriales; producto escalar; operadores lineales.
2. Bases discretas ortonormales; componentes de la función de onda en la base ortonormal; el producto escalar en términos de las componentes, relación de cerradura.
3. Bases continuas ortonormales: ondas planas, funciones delta de Dirac.
4. Espacio de estados y la notación de Dirac: vectores "*ket*" y "*bra*"; espacios duales y la correspondencia entre *bra*'s y *ket*'s; operadores lineales; el operador hermitiano adjunto y la notación de Dirac; operadores hermitianos.

5. Representaciones en los espacios de estados: definición de una representación; relaciones de ortonormalización y de cerradura; representación de bra's y ket's; representación de un operador; cambio de representación.
6. Ecuaciones de eigenvalores y observables: eigenvalores y eigenvectores de un operador; propiedades de los eigenvalores y eigenvectores de un operador hermitiano; definición de observable; conjunto completo de observables que conmutan y teoremas relacionados.
7. Representación de los operadores de posición y de momento.

### ***Tercera Unidad: Los postulados de la mecánica cuántica***

***Duración: 10 horas***

**Competencia:** Con base en las herramientas matemáticas estudiadas en la unidad anterior, el estudiante comprenderá que la mecánica cuántica se puede construir a partir de un conjunto de axiomas que permiten obtener cantidades que son comparables con las mediciones experimentales. Esta forma axiomática de concebir los principios físicos sugeridos por la experimentación integran los postulados básicos de la mecánica cuántica.

#### **Contenido**

1. Postulados de la Mecánica Cuántica: descripción del estado de un sistema; descripción de las cantidades físicas; mediciones de cantidades físicas; evolución temporal de sistemas físicos; reglas de cuantización.
2. Interpretación física de los postulados: reglas de cuantización y la interpretación de la función de onda; cuantización de cantidades físicas; el proceso de medición; el valor esperado de una observable; incertidumbre en una medición; compatibilidad de observables; compatibilidad y las reglas de conmutación; preparación de un estado.
3. Implicaciones físicas de la ecuación de Schrödinger: propiedades generales de la ecuación de Schrödinger; sistemas conservativos.

4. El principio de superposición y las predicciones físicas: la interpretación física de una superposición lineal de estados; degeneración; el espectro continuo.

***Cuarta Unidad: Aplicación de los postulados a casos simples:***

***sistemas de espín  $\frac{1}{2}$  y sistemas de dos niveles.***

***Duración: 10 horas***

**Competencia:** Una vez comprendido la estructura matemática y la interpretación física de los postulados discutido en la Unidad anterior, el estudiante aplicará la teoría para la resolución de problemas reales que han demostrado el éxito de la formulación e interpretación de la mecánica cuántica. Los sistemas que se pretende estudiar en esta unidad ayudarán a un mejor entendimiento de los postulados y sus consecuencias. Aparte de su relativa simplicidad matemática, estos sistemas exhiben un comportamiento cuántico que puede ser verificado experimentalmente.

**Contenido**

1. Partícula con espín  $\frac{1}{2}$  y la cuantización del momento angular: el experimento de Stern-Gerlach; la observable  $S_z$  y el espacio de estados de espín; preparación de diversos estados de espín; medición de  $l$  espín; evolución del espín  $\frac{1}{2}$  en un campo magnético uniforme.
2. Estudio general del sistema de dos niveles: el caso estático y el acoplamiento de los estados estacionarios del sistema; el caso dinámico y la fórmula de Rabi.

## ***Quinta Unidad: El oscilador armónico unidimensional***

***Duración: 6 horas***

**Competencia:** El estudiante estudiará las propiedades generales de los eigenvalores y eigenfunciones de un sistema físico de gran interés teórico: el oscilador armónico en una dimensión. El alumno comprenderá que el oscilador armónico aparece en situaciones físicas en donde los potenciales con cierto grado de complejidad pueden aproximarse en la región de un mínimo mediante curvas parabólicas. Es por esto que el modelo de oscilador se trata esencialmente de la teoría de oscilaciones pequeñas alrededor de un mínimo de potencial. El alumno comprenderá que los resultados obtenidos en la presente unidad son aplicables a un amplio abanico de fenómenos físicos, como por ejemplo, vibraciones de átomos y moléculas alrededor de su posición de equilibrio y las oscilaciones de átomos o iones de una red cristalina (fonones).

### **Contenido**

1. Propiedades generales del Hamiltoniano cuántico
2. Eigenvalores y eigenfunciones del Hamiltoniano: el método algebraico (operadores de creación y aniquilación); el método polinomial.
3. Valores esperados e incertidumbre.
4. Propiedades del estado base del oscilador.
5. Evolución temporal de los valores esperados.
6. Estados coherentes.
7. Modos normales de dos osciladores acoplados.
8. El oscilador isotrópico tridimensional.
9. Fonones.

## ***Sexta Unidad: Propiedades generales del momento angular en la mecánica cuántica***

***Duración: 16 horas***

***Competencia:*** El alumno comprenderá la importancia del problema del momento angular en la mecánica cuántica, debido a su gran importancia en diverso dominios de la física, como lo son, la clasificación de los espectros atómicos, moleculares y nucleares, el espín de partículas elementales y el magnetismo, por mencionar algunos. El alumno comprenderá que en mecánica cuántica, además de un momento angular orbital,  $L$ , existe un momento angular intrínseco llamado espín, y que la física de momento angular involucra fenómenos (como el de la cuantización espacial), que al igual que el espín, no tienen contraparte clásica, pero son fundamentales para entender sistemas cuánticos simples. El alumno analizará las propiedades del operador que representa al momento angular orbital, así como las reglas fundamentales de conmutación que obedece, propiedades que pueden extenderse al caso del momento angular total,  $J$  (momento angular orbital + espín). Con base en las relaciones de conmutación se estudiarán los eigenvalores y eigenfunciones de momento angular y su interpretación física.

### **Contenido**

1. Relaciones de conmutación en el momento angular: momento angular orbital; generalización del momento angular.
2. Teoría general de momento angular: los operadores  $J_+$  y  $J_-$ ; eigenvalores de los operadores  $J^2$  y  $J_z$ .
3. Aplicaciones del momento angular orbital: eigenvalores y eigenfunciones de  $L^2$  y  $L_z$ ; valores de los números cuánticos  $l$  y  $m$ ; propiedades fundamentales de los armónicos esféricos; mediciones de  $L^2$  y  $L_z$ .



4. El rotor rígido.
5. Partícula cargada en presencia de un campo magnético: niveles de Landau.

## ***Séptima Unidad: La partícula en un potencial central: el átomo de hidrógeno***

***Duración: 12 horas***

***Competencia:*** Se estudiarán las propiedades de las eigenfunciones y eigenvalores de una partícula sujeta a un potencial central  $V(r)$  en tres dimensiones [esto es, sujeto a un potencial  $V(r)$  que sólo depende de la distancia  $r$  al origen]. Se estudiarán las propiedades de conmutación del Hamiltoniano del sistema,  $H$ , con los operadores de momento angular orbital  $L^2$  y  $L_z$  introducido en la Unidad anterior. Esto simplifica la determinación de los eigenvalores de  $H$ , ya que estas funciones serán eigenfunciones de  $L^2$  y  $L_z$ , lo que permite identificar inmediatamente la dependencia angular de las funciones y obtener una ecuación diferencial radial para el Hamiltoniano  $H$ . Los métodos desarrollados en la presente Unidad se aplicarán al caso especial en que  $V(r)$  sea un potencial Coulombiano. El estudiante comprenderá que el átomo de hidrógeno nos provee el sistema más simple de este tipo de potencial, y calculará explícitamente las energías de los estados ligados y sus correspondientes eigenfunciones. También estudiará las propiedades físicas de sistemas más complejos, como el del deuterón. El alumno comprenderá que los resultados exactos para el átomo de hidrógeno sirven como base para describir en forma aproximada a los sistemas compuestos por varios electrones.

### **Contenido**

1. El Hamiltoniano cuántico.

2. Separación de variables: dependencia angular de las eigenfunciones; la ecuación radial; comportamiento de la solución radial en el origen.
3. Estados estacionarios de una partícula en un potencial central: números cuánticos y degeneración de los niveles de energía.
4. Movimiento del centro de masa y movimiento relativo para un sistema de dos partículas: movimiento del centro de masa y movimiento relativo en la mecánica clásica; separación de variables en mecánica cuántica; eigenfunciones y eigenvalores del Hamiltoniano.
5. El átomo de hidrógeno: cambio de variables; solución de la ecuación radial; cuantización de la energía y las funciones radiales.
6. Estados ligados en un pozo esférico: el deuterón.
7. Dispersión por un pozo esférico uniforme.
8. La partícula libre: desarrollo de una onda en términos de ondas esféricas.

### ***Octava Unidad: Espín y adición de momento angular***

***Duración: 12 horas***

**Competencia:** El alumno comprenderá que las partículas subatómicas poseen un momento angular intrínseco llamado espín, y que se trata de una propiedad intrínseca de la partícula como lo es la carga o la masa. Se estudiarán las diversas situaciones físicas observadas experimentalmente en el contexto de la física atómica, en donde se manifiesta la existencia del espín: la estructura fina de las líneas espectrales, el efecto Zeeman, y el comportamiento de los átomos de plata en el experimento de Stern-Gerlach. El alumno estudiará la formulación matemática de las funciones de onda con espín (espinores), así como la representación matricial de los operadores de espín. Se estudiarán las propiedades generales del problema de la adición de momento angular para dos partículas con espín  $\frac{1}{2}$  y se introducirá el concepto de singulete y de triplete.

**Contenido**

1. El descubrimiento experimental del momento angular interno: el efecto Zeeman normal; el experimento de Stern-Gerlach.
  2. Formulación matemática para el espín  $\frac{1}{2}$ .
  3. Propiedades de las matrices de Pauli.
  4. Espinores.
  5. Momento magnético.
  6. Grados de libertad espaciales y el espín.
- Adición de momento angular: el caso de la adición de dos espines  $\frac{1}{2}$ .

## ***Novena Unidad: Métodos aproximados para estados estacionarios***

***Duración: 6 horas***

***Competencia:*** El alumno comprenderá que las soluciones exactas de la ecuación de Schrodinger sólo existen para algunas situaciones físicas idealizadas, y que normalmente se recurre a soluciones de la misma utilizando métodos aproximados, como la teoría de perturbaciones, el método variacional y el método WKB por mencionar algunos. La teoría de perturbaciones se aplica en aquellos casos en que el sistema real puede ser descrito por un pequeño cambio efectuado en un sistema idealizado conocido. Otro de los métodos aproximados es el variacional, el cual resulta apropiado para el cálculo del estado base de sistemas en donde se tiene conocimiento de la forma aproximada de la función de onda. El método WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) es aplicable en el límite clásico. El estudiante estudiará las diversas técnicas perturbativas y las aplicará para resolver de problemas en diversos contextos de la física atómica.

### **Contenido**

1. Teoría de perturbaciones independiente del tiempo (Rayleigh-Schrödinger): caso no-degenerado; caso degenerado.
2. El principio variacional.
3. Método WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin).
4. Teoría de Perturbaciones de Brillouin-Wigner.



## VII. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### ▪ Del maestro:

- Discutirá en clase, a manera de encuadre, el marco histórico, científico y cultural en el que se formularon las teorías y experimentos más representativos de cada unidad, así como de los avances más recientes en la disciplina con la finalidad de brindarle al alumno un panorama actualizado de la mecánica cuántica.
- Explicará, desarrollará y aplicará en clase las técnicas para la resolución de problemas típicos de mecánica cuántica.
- Fomentará la participación activa en el aula, tanto en la resolución de problemas, como en la discusión de conceptos.
- Proporcionará tareas para resolver fuera del salón de clases, que consistirán en un conjunto de problemas cuya solución involucre la aplicación de las técnicas aprendidas en el aula, y reafirmen los conceptos discutidos en clase.
- Fomentará la disciplina, la responsabilidad y la honestidad en el trabajo individual y en equipo.
- Utilizará animaciones computacionales y paquetes de resolución numérica para ilustrar diversos aspectos relacionados con la mecánica cuántica.
- 

### ▪ Del alumno:

- Aplicará, dentro y fuera del aula, los conceptos y las técnicas aprendidas para la resolución de problemas de mecánica cuántica.
- Desarrollará la disciplina, la responsabilidad y la honestidad en el trabajo individual y en equipo.
- El alumno participará activamente, tanto dentro como fuera del aula, en la discusión de los conceptos de mecánica cuántica.
- El alumno desarrollará gradualmente un panorama amplio del estado actual de la disciplina, mediante la lectura y discusión (fuera y dentro del aula) de artículos de divulgación y de investigación científica.
- Utilizará animaciones computacionales y paquetes de resolución numérica para estudiar y resolver problemas relacionados con diversos aspectos de la mecánica cuántica.

## VIII. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

- **Criterio de acreditación:** Se requiere un mínimo de un 80% de asistencia. La calificación mínima aprobatoria es 6 (seis).
- **Criterio de calificación:**
  - Exámenes parciales: 50%.
  - Exámenes semanales: 20%.
  - Examen trimestral: 10 %.
  - Examen semestral: 10%.
  - Elaboración de resúmenes y presentación oral: 5%.
  - Tareas basadas en animaciones computacionales y paquetes de resolución numérica: 5%.



**IX. BIBLIOGRAFÍA**

**Básica**

**Complementaria**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ C.-Tannoudji, B. Din and L. Laöle. <i>Quantum Mechanics</i> Vols. 1-2, Wiley &amp; Sons (1992).</li> <li>▪ F. Schwabl, <i>Quantum Mechanics</i>, 3<sup>rd</sup> edition, Springer-Verlag Berlin (2002).</li> <li>▪ W. Greiner, <i>Quantum Mechanics, an Introduction</i>, 4<sup>th</sup> edition, Springer-Verlag (2000).</li> <li>▪ R. L. Liboff, <i>Introductory Quantum Mechanics</i>, 4<sup>th</sup> edition, Addison Wesley (2002).</li> <li>▪ Ramamurti Shankar, <i>Principles of Quantum Mechanics</i> 2<sup>nd</sup> edition, Springer (1994).</li> <li>▪ L. De la Peña, <i>Introducción a la Mecánica Cuántica</i>. Editorial Científica Universitaria, UNAM, Fondo de Cultura Económica, 2<sup>nda</sup> ed. (1991).</li> <li>▪ S. Brandt, H. S. Dahmen y T. Stroh, <i>Interactive Quantum Mechanics (with CD-ROM)</i>, Springer-Verlag New York, Inc. (2003).</li> <li>▪ B. Thaller, <i>Visual Quantum Mechanics: Selected Topics with Computer-Generated Animations of Quantum-Mechanical Phenomena (with CD-ROM)</i>, Springer-Verlag (2002).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ M. A. Morrison, <i>Understanding Quantum Physics: a user's manual</i>, Prentice Hall (1990).</li> <li>▪ R. Eisberg y Resnick, <i>Física Cuántica</i>, Editorial Limusa (1993).</li> <li>▪ E. Merzbacher, <i>Quantum Mechanics</i>, 3<sup>rd</sup> edition, Wiley, (1997).</li> <li>▪ R. Feynman, Leighton, and M. Sands. <i>The Feynman Lectures of Physics, Vol. III</i>. Addison-Wesley (1965).</li> </ul> |
|--|---|