

FÍSICA ELECTRÓNICA

ORIENTACIÓN DE LA ASIGNATURA

Física Electrónica es una asignatura del área Electrónica del segundo nivel que tiene a Álgebra, Geometría Analítica, Análisis Matemático I y Física I como asignaturas correlativas para cursar, mientras que Análisis Matemático II y Física II constituyen las materias correlativas para aprobar.

La asignatura está diagramada en vista a la formación de un alumno de la carrera de Ingeniería Electrónica. Se trata de proveer a estos estudiantes una base de física moderna sólida para encarar el estudio que harán en las materias posteriores sobre el comportamiento de los dispositivos electrónicos y también facilitarles el futuro acceso a la comprensión de cualquier nuevo descubrimiento científico-tecnológico en esta área en continua evolución. El plan de la asignatura está diseñado principalmente para brindar al alumno el conocimiento de aquella temática particular de la Física Moderna que permite sustentar a ese vasto mundo de la electrónica con el cual va a interactuar. Para lograr tal propósito la asignatura lo introduce en la teoría de la relatividad especial de Einstein y de la física de la mecánica cuántica. Con este nuevo conocimiento se pretende completar la formación en las ciencias físicas del futuro ingeniero, ya iniciada en los cursos de física clásica de Física I y Física II, incluidos el plan de la carrera. Sin duda contar con una mejor formación general en Física, permite al estudiante desarrollar una visión más abarcativa del mundo profesional, de la investigación y desarrollo. Es de esperar que el conocimiento de la física, más allá de la clásica, despierte en el alumno curiosidad y espíritu crítico por acceder a la comprensión de las teorías y de sus aplicaciones ubicadas en la vanguardia del conocimiento respecto de la constitución y estructura de la materia. A tal efecto, se procura enfatizar en los alumnos la fuerte vinculación existente entre el desarrollo de la tecnología actual con la física. Además se contribuye a que los estudiantes valoren la importancia de la búsqueda del conocimiento y descubran la trascendencia de su futura inserción en el mundo laboral como usuarios y generadores del desarrollo tecnológico. Sin duda, también el conocimiento de la física moderna termina brindando al alumno una mayor riqueza cultural. Se pretende que el desarrollo de esta temática permita al alumno lograr incorporar valiosos objetivos y competencias, las cuales se analizan a continuación de cada grupo temático en que se ha dividido el plan de estudio de la asignatura Física Electrónica.

La materia incluye un módulo temático de ondas clásicas, introducido para generar en el alumno conceptos ondulatorios básicos. Estos conceptos son necesarios y sirven de base para el estudio posterior de la teoría de la mecánica cuántica. Su contenido sumario es el siguiente:

- Pulsos y ondas viajeras en medios de propagación elásticos. Ecuaciones de transformación de coordenadas de Galileo. Argumento viajero.
- Ecuación de onda. Ondas armónicas y representación con fasores.
- Propagación de energía. Onda estacionaria.
- Ondas electromagnéticas. Vector de Poynting.
- Comportamiento ondulatorio clásico: difracción e interferencia. Principio de Huygens. Efecto Doppler sonoro. Boom sónico. Efecto Cherenkov. Experiencia de Young con rendijas y ventanas. Onda incidente, reflejada y transmitida. Condiciones de borde.

La temática de ondas se introduce al alumno empleando las ondas mecánicas por resultar sumamente didácticas. La propagación de pulsos ya sean longitudinales o transversales en sogas elásticas o en resortes tensionados y la generación de ondas estacionarias permiten al alumno observar y experimentar el nuevo fenómeno con gran detalle. Es importante que el alumno pueda deducir el argumento viajero empleando las transformadas de coordenadas de Galileo y obtener la ecuación de onda a partir de las ecuaciones básicas que rigen al fenómeno ondulatorio estudiado, ya sea a partir de la 2da ley de Newton y de la ley de elasticidad de Hooke para el caso de ondas mecánicas, como las ecuaciones de Maxwell para las respectivas ondas electromagnéticas. Se destaca el estudio de las ondas armónicas y su representación en el plano complejo mediante fasores, destacándose las ventajas operativas de esta representación para realizar análisis, en especial el de la propiedad de interferencia de ondas. Se busca resaltar en el alumno que los fenómenos ondulatorios observados en un entorno físico pueden ser hallados básicamente en otros, más allá de las propias características y detalles que su entorno le imponga; tal como el efecto Doppler sonoro y el astronómico (se estudia dentro del módulo de relatividad), el boom sónico y la radiación Cherenkov. Particular importancia se da las ondas estacionarias para resaltar que en ellas no existe flujo neto de energía sino que ésta se halla fija local y temporalmente en un juego entre en energía potencial con la cinética (en el caso onda mecánica) o electromagnética. Es importante el estudio de la propagación de ondas cuando existe a partir de un punto un cambio en las condiciones de propagación, donde se analizan la onda incidente, reflejada y transmitida. Así sucede en la unión de dos sogas semi-infinitas tensionadas, y de manera análoga, en la incidencia normal de luz desde un medio transparente a otro. Este tipo de problemas se resuelve con las condiciones de borde, las cuales matemáticamente son las mismas y da el fundamento para ser aplicado más adelante en la temática de cuántica. El estudio se completa con la experiencia de Young para el caso ideal con rendijas y también con ventanas, que permiten resaltar la propiedad de interferencia de ondas y utilizar a ésta como propiedad identificatoria para un fenómeno ondulatorio. Se hace hincapié para que el alumno pueda modelar teóricamente estas experiencias utilizando la representación de ondas con fasores y llegue a deducir la intensidad del patrón de interferencia que se produce en la 2da pantalla. Se pretende que el alumno comprenda y analice las simplificaciones y aproximaciones que son necesarias introducir a fin de captar bien la esencia del fenómeno físico estudiado y las consecuencias que estas limitaciones imponen; la pérdida de detalles que el modelo no puede mostrar. La realización experimental en el laboratorio le brinda al alumno la posibilidad de comparar el resultado observado con el resultado teórico estudiado.

El contenido sumario de la Teoría de la Relatividad Especial de Einstein incluido en la asignatura es el siguiente:

- Postulados de la relatividad especial de Einstein.
- Ecuaciones de transformación de coordenadas de Lorentz.
- Consecuencias de la teoría de relatividad especial: pérdida del tiempo absoluto galileano, dilatación del tiempo, contracción de longitudes, transformación de velocidades relativistas, efecto Doppler relativista, masa relativista, equivalencia masa - energía cinética y su generalización.
- Propiedad de masa en reposo nula y masa dinámica de la luz. Presión de radiación.
- Transformación del campo eléctrico. Radiación por carga eléctrica acelerada. Lóbulo de radiación. Fórmula de Larmor.

Se pretende que al desarrollar esta temática el alumno analice los resultados negativos de los experimentos de Michelson-Morley y la consecuencia que ello implica; descartar la existencia del éter como medio material hipotético de propagación de la luz. Confirmada la invariancia de la velocidad de la luz, surge la necesidad de formular la nueva teoría de la relatividad especial de Einstein que capte esta realidad y supere el fracaso que se obtuvo al aplicar la transformación de Galileo para formular la hipótesis del éter. Enunciar y comprender los postulados de la nueva teoría, los cuales permiten deducir de manera sencilla las correctas transformadas de coordenadas de Lorentz. Discutir la pérdida del concepto arraigado del tiempo absoluto galileano y mostrar el concepto de la relatividad de la simultaneidad de eventos en el marco relativista. Es importante que el alumno analice y comprenda las consecuencias que implica la nueva teoría, como la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes. Cabe destacar las nuevas leyes de transformación de velocidades, las cuales conservan los conceptos del movimiento relativo galileano con el agregado de factores de distorsión. Los alumnos deben captar que estos factores garantizan que cualquier observador inercial que sea observado persiguiendo a un rayo de luz, independientemente de la velocidad con que lo haga, medirá la invariancia c de su velocidad. También sirve para mostrar el principio de correspondencia; nuestro mundo galileano resulta ser una aproximación relativista para bajas velocidades. Se pretende que el alumno pueda aplicar las transformaciones de Lorentz para resolver problemas unidimensionales espacialmente. Comprender las incongruencias a que conduce la suposición de la propiedad de masa invariante, aceptada naturalmente en la mecánica newtoniana, al analizar un caso sencillo de choque, y la corrección propuesta por Einstein al introducir el concepto de masa relativista en su redefinición de la cantidad de movimiento, que elimina las contradicciones. Comprender que en el marco relativista el análisis de la integral de trabajo conduce a la equivalencia entre masa y energía cinética y la natural generalización para cualquier tipo de energía propuesta por Einstein. Como otra prueba del principio de correspondencia, la expresión relativista de la energía cinética a bajas velocidades converge a la expresión a la que estamos acostumbrados. También la relatividad le permite al alumno completar el estudio de las ondas electromagnéticas, dado la buena interrelación que esta teoría tiene con las leyes de Maxwell; la ecuación de ondas resulta ser invariante ante las transformadas de Lorentz. Por un lado, permite deducir la propiedad de masa en reposo de la luz y de su capacidad de transportar cantidad de movimiento como onda electromagnética en el vacío a través de su propiedad de masa dinámica desplazándose a c . Esta propiedad es mostrada al alumno con toda claridad con la experiencia conocida como la caja de Einstein. Por otro, la deducción inmediata de las leyes de transformaciones del campo eléctrico de una carga estática en un marco de referencia inercial a otro que lo observa a velocidad constante, permite deducir de manera extraordinariamente sencilla, el modelo de radiación electromagnético por cargas eléctricas aceleradas, su típico lóbulo de radiación y llegar a la conocida fórmula de la potencia total irradiada de Larmor. Es importante resaltar en el alumno que este es el modelo al cual correctamente se llega aplicando la teoría electromagnética de Maxwell, aunque por un camino matemáticamente largo y sumamente tedioso. La falla de este modelo de radiación, el cual debería cumplirse en el electrón acelerado del átomo de hidrógeno en su estado fundamental, señala la necesidad de introducir una nueva teoría, la mecánica cuántica.

El contenido sumario de la teoría de la mecánica cuántica incluida en la asignatura es el siguiente:

- Experiencia de Young con electrones. Efecto Compton. Concepto Dualidad onda-partícula.

- Efecto fotoeléctrico. Experiencia de difracción de electrones por Davisson Germer.
- Breve repaso conceptos de probabilidad clásica para variables discreta y continua.
- Teoría de la mecánica cuántica para partículas no relativistas. Ecuación de Schrödinger. Postulado sobre la interpretación de su solución, la función de ondas y sus propiedades. Conservación de la probabilidad global y local. Normalización. Corriente de probabilidad. Otras Escuela interpretativas de la cuántica; la realista de Einstein (variables ocultas) y la agnóstica de Planck.
- Relaciones de incertidumbre. Principio de indeterminación de Heisenberg.
- Operadores cuánticos para posición, cantidad de movimiento, hamiltoniano, energía cinética, momentum angular (para módulo y componentes cartesianas). Su empleo para calcular valores esperados e incertidumbre.
- Resolución de la Ecuación de Schrödinger por separación de variables para problemas unidimensionales. Partícula en una caja de potenciales infinitos, escalón de potencial, potencial barrera (efecto túnel), potencial armónico, pozo de potencial finito. Molécula de hidrógeno.
- Spin electrónico. Experiencia de Stern Gerlach. Cuantización espacial de la componente z del spin electrónico, S_z . Representación del estado cuántico del spin; ecuación de autovalores para el operador de S_z . Relaciones de incerteza entre sus otras componentes cartesianas.
- Modelo del átomo de hidrógeno. Modelo semiempírico de Bohr. Niveles cuantizados de energía permitidos. Modelo cuántico. Ecuaciones de autovalores para los operadores Hamiltoniano, momentum orbital al cuadrado L_o^2 y componente z del momentum, L_z . Cuantización espacial de L_o^2 y L_z . Espectros de emisión y absorción.
- Sistemas multipartículas. Partículas idénticas en mecánica cuántica. Átomos multielectrónicos. Energía de Fermi. Estadística cuántica. . Estadística de Maxwell Boltzmann. Estadística Bose-Einstein. Estadística Fermi-Dirac. Cavidad resonante. Radiación de cuerpo negro.
- Sólidos cristalinos. Potenciales periódicos. Modelo de Kronig- Penny. Su simplificación mediante el reemplazo de las barreras por funciones delta Dirac. Estructura de bandas de energía. Propiedades de conducción eléctrica para metales, aisladores y semiconductores. Semiconductores de silicio tipo n y tipo p. Junturas p-n.
- Acción Láser. Emisión espontánea. Emisión estimulada. Inversión de población. . Láseres de tres y cuatro niveles.

En cuanto al contenido a desarrollar en el extraño mundo de la mecánica cuántica, cabe destacar que se siguen los lineamientos más actuales para su enseñanza, de acuerdo con la bibliografía más moderna (Tonwsend, J. y Griffiths, D.J.) . Ha sido tradicional enseñar su contenido siguiendo el orden temático que impuso el camino histórico por el cual evolucionó la física moderna. Esto involucraba analizar los puntos principales realizados por Planck, Einstein, Rutherford, Bohr, y otros hasta llegar a Schrödinger. Más allá de que los aspectos históricos son interesantes, la exposición de toda esa fenomenología dejaba poco tiempo para profundizar los conceptos que brindan al alumno el entendimiento de la física que subyace en ellos. Hoy se cuenta con resultados experimentos reales que permiten mostrar desde un principio como funciona la teoría de la mecánica cuántica, más allá de los experimentos pensados con los que fue desarrollada. Tal es el caso del experimento de interferencia de Young de doble rendija con

electrones, realizado con éxito en 1989 por Tomohura, que produce un patrón de impactos con el aspecto análogo al obtenido con luz monocromática. Este resultado experimental ponen en evidencia desde un comienzo que existe aleatoriedad al no poderse predecir donde impacta cada electrón. Para justificar la formación del patrón acumulado de impactos, permite a su vez introducir con naturalidad la amplitud de probabilidad para captarlo. Además el patrón experimentalmente resulta sensible de acuerdo a la relación de Broglie. También el principio de Incertidumbre juega en él un papel esencial ya que ese patrón de impactos similar en aspecto al resultado con ondas monocromáticas de luz solo se produce si los electrones emitidos por el cañón electrónico presenta una dispersión superior a la separación de rendijas, lo que garantiza desconocer por cual de ellas pasan los electrones. Desde un comienzo surge claro para el alumno que la teoría de la mecánica cuántica, cuya introducción ortodoxa se la conoce como la interpretación de Copenhagüe, funciona para explicar el mundo experimental de las partículas microscópicas no relativistas. Una descripción más ajustada vuelve posteriormente a realizarse luego de introducir la ecuación de Schrödinger con paquetes de ondas de Broglie, cuya velocidad de grupo coincide con la velocidad esperada de los electrones emitidos por el cañón electrónico. La introducción del efecto Compton permite completar este cuadro descrito en la jerga de la vieja cuántica como el comportamiento dual onda-partícula, la luz como partícula, cuya teoría no es motivo de este curso. Es importante hacer un breve repaso de los conceptos de probabilidad clásica, tanto para variables discreta como continua. En este contexto se introduce con naturalidad la ecuación de Schrödinger, la cual juega un rol muy similar a la ecuación de ondas para la luz, y el postulado de interpretación de su solución, la función de ondas que pertenece al dominio complejo, con el cual se da su significado físico al considerar su amplitud al cuadrado como una función de densidad de probabilidad. Para lograr compenetrar al alumno en como esta revolucionaria teoría funciona para describir nuestro mundo, se analizan las propiedades que la función de ondas posee, entre ellas la conservación global de la probabilidad, mientras que su conservación local conduce al concepto de corriente de probabilidad, de gran utilidad para interpretar problemas no normalizables. Se prepara al alumno para hacer uso de esta herramienta de manera sencilla, introduciendo los operadores cuánticos para calcular esencialmente valores esperados con sus incertidumbres para todas las variables dinámicas de interés, como ser cantidad de movimiento, hamiltoneano y las demás restantes, enfocados a problemas en una sola dimensión. La herramienta queda así operativamente preparada para su ágil aplicación, permitiéndolo ahora enfocar al alumno en la capacidad que tiene esta teoría de brindar una descripción estadística los fenómenos físicos que ocurren en el mundo microscópico. El primer problema a resolver es el conocido como partícula en una caja, con potenciales ideales infinitos en sus extremos. Un problema matemáticamente sencillo pero interesante porque permite mostrar al alumno muchos efectos cuánticos e introducirlo en su formalismo. Al desarrollar este ejemplo se permite al alumno interiorizarse en como resolver ecuación de Schrödinger por el método de separación de variables, el cual termina reduciéndose a resolver la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo. Se le enseña al alumno que ésta ecuación es la que debe ser resuelta para cada problema particular identificado por la función potencial que caracteriza la interacción con la partícula. La solución espacial es sencilla y combinada con la temporal constituyen básicamente ondas armónicas complejas viajeras, que el alumno está habituado a tratar como representación fasorial de las ondas armónicas clásicas vistas. En este entorno el alumno aprende a normalizarlas para adecuarlas correctamente para su lectura cuántica. Cabe notar que las mismas tienen módulo constante, permitiéndolo caracterizar estas soluciones como estados estacionarios. Al hacerles cumplir las condiciones de borde trae con consecuencia un efecto cuántico destacado; la discretización ó cuantización de la energía. Por otro lado, con el cálculo del valor esperado de la energía el alumno descubre que es la constante de separación

utilizada en el método y que tiene la propiedad de tener incertidumbre nula. La técnica de operadores permite mostrar que la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo constituye matemáticamente una ecuación de autovalores para el operador de energía, siendo éstos las energías cuantizadas de los estados estacionarios y las ondas armónicas complejas viajeras correspondientes, sus autofunciones. Es interesante destacar a esta altura que a pesar de ser las soluciones estacionarias dependientes de espacio y tiempo, las correspondientes densidades de probabilidad son funciones solo del espacio, resultando ser constantes en el tiempo. Para lograr soluciones más generales que si dependan del tiempo, mostrándo una densidad de probabilidad con dinámica, surge natural obtenerlas a partir de construir una función de ondas más general. Esta última se propone obtenerla como la suma pesada de autofunciones, cuyos pesos al cuadrado dan la probabilidad de medir la energía de la partícula para cada uno de los autovalores correspondientes. Se aprovecha la ventaja de que las autofunciones obtenidas constituyen una base ortonormal completa de funciones, propiedad deseada por los cuánticos y que en general resulta matemáticamente complicado de obtener en otros problemas. En el ejemplo que se viene desarrollando la función de ondas más general es una serie de Fourier, cuyo propiedad de ortogonalidad es sencilla de demostrar y su normalización conduce a la ortonormalidad. Para el alumno resulta sumamente didáctico confrontar estos resultados teóricos con un experimento pensado, haciéndole observar que puede construirse introduciendo en la caja distintas cantidades de partículas con valores de energías elegidos dentro de los autovalores del problema. Las proporciones de cada tipo de partícula al número total constituyen por definición las probabilidades a priori de que la medida de energía arroje un autovalor. Cabe resaltarle al alumno que este proceso de medición, según la ortodoxia cuántica, “crea” la medida, la partícula adopta uno de los autovalores de energía y si reiteradamente repite el experimento, respetando las mismas condiciones iniciales, terminará comprobando estadísticamente las probabilidades elegidas a priori. Este extraordinario y extraño comportamiento se conoce como el colapso de la función de ondas. Resulta muy ilustrativo y didáctico que el alumno interactúe con applets de la web donde encontrará este problema y otros para afianzar sus nuevos conceptos cuánticos

Todavía este ejemplo permite mostrar aún más. Para partículas en el estado fundamental se invita al alumno que compruebe por cálculo directo el principio de incertidumbre entre la posición y la cantidad de movimiento. Con partículas de mayor energía, estados excitados, se comprueba como se aleja cada vez más del límite establecido. Las distintas relaciones de incertidumbre son propias de la mecánica cuántica. También resulta interesante para el alumno justificarla empleando la relación de Broglie y el concepto del poder separador ondulatorio.

Este mismo ejemplo también permite comprobar el principio de correspondencia de la teoría de la mecánica cuántica con la física newtoneana. Para ello se cambia la escala del problema adaptándola a nuestro mundo macroscópico, reemplazando la masa del electrón por una representativa macroscópica del orden del kilogramo, y la dimensión atómica de la caja del orden del Amström por el metro. En este nuevo contexto una partícula macroscópica, moviéndose con una energía cinética representativa de este entorno del orden del joule, presenta un grado de cuantización de energía tan fino que es equivalente a decir que cualquier valor, incluso el cero, está permitido. Se completa la comprobación forzando la descripción determinista de la partícula a una descripción estadística equivalente de la misma. Para ello basta definir - de manera axiomática forzada - la probabilidad de encontrar la partícula determinista en un intervalo en x como proporcional al tiempo de permanencia en él. La plena concordancia con la descripción cuántica macroscópica permite al alumno formarse la idea de que la física cuántica es una teoría más amplia que incluye a nuestro mundo newtoniano como una aproximación, pero que en nuestro entorno se la descarta debido a su complejidad operativa.

Finalmente, el experimento de partículas una caja preparado con iguales cantidades de partículas idénticas de dos energías permitidas, sirve para razonar por analogía la descripción cuántica del sorprendente resultado del experimento de Stern Gerlach, que arroja solo dos valores medidos de la componente z del momentum angular intrínseco del electrón, spin up y spin down. Es interesante emplear la imagen clásica del electrón como un trompo girando, aunque aquí no es correcta, para razonar y caracterizarlo tanto con un momentum angular como con un momento dipolar magnético. La cuantización espacial descubierta puede justificarse cuánticamente considerando que el operador de la componente z del spin electrónico conduce a una ecuación de dos autovalores, con dos autofunciones. Este resultado contrasta con el esperado razonando clásicamente, que espera medir de manera equiprobable valores proyectados en z desde $-S$ a S pasando por cero. Nuevamente es importante resaltarle al alumno como se describe cuánticamente el proceso de medición, el cual al medir materializa a los espines electrónicos con precesión alrededor de las líneas de campo magnético del imán del instrumento.

El estudio del átomo de hidrógeno es conveniente abordarlo empleando el modelo de Bohr, a pesar de ser semiempírico, dado que permite deducir rápidamente a los mismos niveles cuantizados de energía que el modelo cuántico exacto provee. Este último surge a partir de resolver por separación de variables la ecuación de Schrödinger planteando para la interacción del electrón con su núcleo el potencial central coulombiano. Dejando de lado el procedimiento matemático de resolución para aquel alumno que desee interiorizarse en ello, si es interesante realizar la descripción cuántica correcta de sus resultados. A esta altura del curso el alumno ha sido expuesto lo suficiente tanto a la teoría como a los aspectos experimentales de la mecánica cuántica como para comprenderlos sin dificultad. Así surge natural asociar la cuantización de la energía a una ecuación de autovalores para el operador Hamiltoniano, siendo sus autovalores los niveles permitidos de energía. El análisis previo del spin electrónico permite también mostrar la increíble cuantización espacial, mucho más rica ya que aquí surge tanto para el módulo del momentum angular orbital al cuadrado, L_o^2 como así también para su componente z , L_z . Para completar la descripción se asocian los respectivos operadores cuánticos de momentum con las correspondientes ecuaciones de autovalores y se señalan las relaciones de incertidumbre que existen entre sus otras componentes. Como prueba experimental de este modelo se enseña al alumno los espectros de emisión del vapor de mercurio de los tubos fluorescentes del aula mediante un sencillo espectrómetro construido con una red de interferencia implementada con un CD. Con el repaso previo de ondas electromagnéticas realizado el curso, el alumno también está en condiciones de analizar el principio de funcionamiento del instrumento.

La ecuación de Schrödinger también es resuelta para diferentes potenciales de interés. Por ejemplo para el potencial escalón se resuelven los casos en que la energía de la partícula sea inferior y supere la altura del escalón. Este problema sienta las bases para resolver e interpretar el potencial barrera, de aplicación en el mundo de la electrónica. Dado que en estos problemas se utiliza la solución no normalizables de las ondas armónicas complejas viajeras, se termina interpretando correctamente el resultado empleando el concepto local de corriente de probabilidad. Aunque es factible realizar el análisis correctamente con paquetes de ondas armónicas por ser normalizables, al carecer los alumnos del conocimiento de los teoremas de Fourier cabe dejar ese camino de lado; si es conveniente mencionarlo por justifica el lenguaje de dispersión que se emplea en su descripción. Es interesante hacer que el alumno razone cual es el comportamiento cuántico y analice las semejanzas y diferencias con el comportamiento clásico esperado. También debido a la fuerte analogía que existe con el comportamiento ondulatorio electromagnético, resulta didáctico para el alumno asociar el comportamiento de resonancias cuánticas con el caso de lentes a las cuales se les ha dado un tratamiento superficial; el rol que juega el ancho de la barrera para partículas con energía superior al potencial es el mismo que

cumple el espesor de la película superficial en una lente para minimizar la reflexión de la luz y aumentar la transmitancia óptica.

Cabe acotar que la resolución del problema de la partícula en la caja de potencial de altura infinita estudiado permite al alumno adquirir una intuición del comportamiento cuántico para aplicarlos en otros problemas afines sin necesidad de resolverlos. Tal son los casos de la interacción de partículas con el potencial armónico y el pozo de potencial de altura finita, de aplicación para interpretar las uniones moleculares - con dos pozos separados por una barrera -. La matemática para resolverlos no reviste gran complejidad, más allá de presentar sus detalles particulares.

Es importante destacar al alumno el importante rol que juega en mecánica cuántica las partículas idénticas. Mientras que en mecánica clásica las partículas idénticas son distinguibles, ya que en teoría es posible hacerles un seguimiento en el tiempo sin afectar su movimiento, en mecánica cuántica resultan indistinguibles. Esta indistinguibilidad sirve para explicar la estabilidad y las propiedades químicas de los elementos, las propiedades eléctricas y mecánicas de los sólidos cristalinos y las propiedades de coherencia de los láseres.

El tema de los sólidos cristalinos suele dejarse como unidad temática para ser estudiada por los alumnos. A tal fin se dispone de bibliografía adecuada y moderna, (Townsend, J, Ibach, H.), que enfatiza el rol que la estructura de bandas de los semiconductores juega en nuestro mundo tecnológico. En los sólidos cristalinos la periodicidad espacial de sus átomos, dispuestos en arreglos periódicos o redes, son responsables de muchas de las propiedades interesantes que posee el sólido. Nuestro interés está enfocado en las propiedades de conducción de la electricidad. Se guía a los alumnos para que comprendan como se forman las bandas de niveles de energía permitidos separadas por bandas prohibidas a partir de la periodicidad natural de la energía potencial. En particular conduce a la estructura de bandas de energía a partir de la cual se comprenden las propiedades eléctricas de los metales, aisladores y semiconductores.

Aunque optar apartarse del camino histórico y enfocarse en enseñar desde un principio como funciona la teoría de la mecánica cuántica, deja para el final ciertos temas para que el alumno los prepare por cuenta. Hay que resaltar que los conceptos ya adquiridos por esta metodología le facilitan su aprendizaje. Tal el caso de el efecto fotoeléctrico, que no reviste dificultad, y se guía al alumno para que contraste el comportamiento clásico esperado con el resultado correcto cuántico. No así con la radiación de cuerpo negro, vinculado a las cavidades electromagnéticas resonantes, conceptos a las cuales los alumnos no han sido expuestos. Cabe mencionar que también se deja en esta situación al experimento más rústico de difracción de electrones de Davisson Germer; la experiencia de Young con electrones introducida en el curso resulta didácticamente superadora.

Durante el cursado las clases son dictadas desarrollando sus contenidos en el pizarrón, con el apoyo de fotocopias y/o transparencias adecuadamente introducidas con fines didácticos ilustrativos. La exposición en pizarrón de los temas brinda al alumno una apropiada velocidad de aprendizaje para abordar la comprensión de los mismos. Esta metodología incluye intercalar en clase la ejecución demostrativa de sencillos experimentos didácticos. Con el mismo fin se guía a los alumnos a visualizar laboratorios simulados brindados por sitios de Internet en applets interactivos y películas, que brindan con realismo la vivencia de la ejecución de experimentos físicos. También, están diagramados algunos laboratorios experimentales para ser ejecutados por los propios alumnos. Las experiencias de laboratorio, en sus versiones simuladas y experimentadas, permiten involucrar al alumno en las habilidades del razonamiento científico, desde el mismo proceso de preparación del experimento, su ejecución con la toma de mediciones y sus errores, el análisis y procesamiento de de datos, la discusión de resultados y finalmente la

confrontación con el resultado teórico físico esperado. Paralelamente con el desarrollo de cada tema se introduce una guía de problemas, permitiendo al alumno profundizar sus conceptos, generar estrategias de resolución de los mismos y analizar si sus resultados dentro del tema estudiado. La articulación adecuada de este conjunto de herramientas didácticas mencionadas busca motivar la curiosidad y el interés del alumno, fomentando su capacidad inquisitiva y expresión de comentarios científicos.

Está previsto tomar dos exámenes parciales, orientados a evaluar principalmente aspectos conceptuales, con posterioridad a que los alumnos hayan trabajado con problemas y laboratorios, y sus correspondientes parciales recuperatorios.

La aprobación de la materia se logra mediante la aprobación de un examen final, que permite evaluar en el alumno el dominio de los conceptos alcanzados.

ARTICULACIÓN DE FÍSICA ELECTRÓNICA EN EL DISEÑO CURRICULAR

De acuerdo a la estructura del diseño curricular, se promoverá la articulación de esta asignatura de segundo nivel con asignaturas a nivel horizontal (del mismo nivel) y a nivel vertical (con asignaturas de niveles inferiores y superiores).

Existe vinculación con asignaturas del primer nivel del Área Matemática, como Sistemas de Representación, Análisis Matemático I, Álgebra y Geometría Analítica, que dan inicio a una adecuada formación del alumno en las matemáticas. La articulación con el Área Física de este nivel, se realiza con la asignatura Física I a través del aprendizaje de la física clásica Newtoniana y conceptos de la termodinámica.

En el mismo nivel, se promoverá la articulación con las asignaturas del Área Matemática a saber, Análisis Matemático II, Probabilidad y Estadística, las cuales completan la formación del alumno en las matemáticas, necesarias para expresar con un lenguaje más preciso la temática de física moderna programada. Con el Área Física de este nivel, existe una fuerte vinculación con la asignatura Física II, la cual termina completando en el alumno el conocimiento de la física clásica, permitiendo mostrar la falla de esta teoría física en la explicación de los fenómenos que dan lugar al desarrollo de la física moderna. Finalmente existe vinculación con la materia Introducción al Análisis de Señales y Sistemas del Área Electrónica, que enseña al alumno los sistemas de números complejos, de gran utilidad a la hora de expresar conceptos físicos.

En el nivel vertical superior, Física Electrónica se vinculará con asignaturas específicas que tratan temas referentes a la electrónica, al brindar esta asignatura los fundamentos físicos básicos para desarrollar luego su propia temática que resulta central en la carrera, tales como Dispositivos Electrónicos y Electrónica Aplicada I del tercer nivel, Electrónica Aplicada II del cuarto nivel, Tecnología Electrónica y Electrónica de Potencia del quinto nivel. Hay relación en forma directa con los contenidos desarrollados en varias de las materias optativas del sexto nivel que harán uso los conocimientos adquiridos en Física Electrónica; Optoelectrónica de Comunicaciones, Física Óptica para Comunicaciones, Fundamentos de Antenas y Diseño de Antenas.

Ing. Héctor R. Bambill
Profesor Adjunto Ordinario