



Universidad Autónoma de Baja California  
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



# INGENIERÍA EN NANOTECNOLOGÍA



ETAPA TERMINAL

APUNTES

**13226 FOTOELECTRÓNICA**

*Prof. E. Efren García G.*

Ensenada, B.C. México 2016

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño -FIAD-

**-Ingeniería en Nanotecnología-**

FOTOELECTRÓNICA

Prof. Dr. E. Efrén García G.

## 1. FOTOELECTRÓNICA

Los objetivos que se intentan alcanzar son los siguientes:

- Entender cómo se emplean las propiedades de los materiales en dispositivos electrónicos útiles y cómo éstos transfieren sus limitaciones.
- Explicar el comportamiento eléctrico de los materiales, en particular el de los semiconductores homogéneos.
- Conocer cómo surgió el concepto de bandas de energía y manejarlo en el estudio de los semiconductores y dispositivos.
- Entender el principio físico del funcionamiento de las estructuras simples ( unión  $p-n$ , estructura MOS, transistor, etcétera).
- Dar cauce a inquietudes relacionadas con la comprensión de “nuevos dispositivos” electrónicos, como los obtenidos de la interacción de la luz y los materiales, entre los cuales se encuentran las memorias magnetoópticas o los láseres.

---

La **electrónica física** se puede entender como el conocimiento que ha permitido el desarrollo de la electrónica hasta los niveles de la complejidad que son comunes hoy día. La electrónica física permite explicar el funcionamiento de los sistemas simples, desde la conducción en un metal hasta el desarrollo de tecnologías, como la que hace posible la fabricación de los modernos circuitos integrados o los más eficientes diodos láser. Entre sus campos se pueden mencionar los siguientes:

- Física de semiconductores: Explicación y predicción de las características de los semiconductores.
- Física de dispositivos: Diseño de dispositivos de estado sólido.
- Tecnología de los semiconductores: Fabricación óptima de dispositivos.
- Microelectrónica: Diseño de circuitos integrados.

## 2. CONCEPTOS PRELIMINARES

- FÍSICA SUBMICROSCÓPICA

- Principio de incertidumbre.
- Hipótesis de De Broglie.
- Hipótesis de Max Plank.

- NOMENCLATURA ÓPTICA

- Términos de radiometría y fotometría.
- Polarización de la luz.

- MECÁNICA CUÁNTICA

- Ecuación de Schrödinger.
- Cuantización de la energía.
- Efecto túnel.

### 3. MATERIALES PARA LA ELECTRÓNICA

- BANDAS DE ENERGÍA

- METALES

- Ley de ohm y de Joule.
- Efecto Hall.

- AISLANTES

- Estadística de Boltzmann.

- SEMICONDUCTORES

- Estructura de bandas.
- Densidad de portadores libres.
- Semiconductores intrínsecos.
- Semiconductores extrínsecos.
- Conductividad.
- Ecuación de continuidad: generación y recombinación.

- PROPIEDADES ÓPTICAS Y MAGNÉTICAS

- Propiedades ópticas.
- Propiedades magnéticas.

- TECNOLOGÍA

#### 4. ESTRUCTURAS ELECTRÓNICAS BÁSICAS

- DIODO DE UNIÓN

- Modelo de Shockley.
- Capacitancia de la zona desértica.
- Ruptura de la unión  $p-n$ .
- Transitorios en la unión  $p-n$ .

- CONTACTOS ÓMICOS Y RECTIFICANTES

- Diagramas de energía en los contactos rectificantes.
- Diagramas de energía en los contactos óhmicos.

- CAPACITOR METAL-ÓXIDO-SEMICONDUCTOR

- Diagrama de energía del capacitor MOS.

- TRANSISTOR BIPOLAR DE UNIÓN (BJT)

- Ecuaciones de transporte.
- Ganancia en corriente.

- MOSFET

- Ecuaciones de transporte.
- Funcionamiento.

- LED, LÁSER Y FOTODETECTORES

---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño -FIAD-

-Ingeniería en Nanotecnología-

FOTOELECTRÓNICA

Prof. Dr. E. Efren García G.

## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

### • FÍSICA SUBMICROSCÓPICA

- Principio de incertidumbre.

Este principio no tiene análogo en la mecánica clásica y es uno de los conceptos principales de la mecánica cuántica. Una de sus representaciones más frecuente es:

$$\Delta x \Delta p \geq h \quad (1)$$

donde  $h$  es la constante universal de Planck, que tiene el valor de  $6.626 \times 10^{-34}$  [Js], y  $\Delta x$  representa la incertidumbre en la medición de la posición, mientras que  $\Delta p$  representa la incertidumbre en la medición de la cantidad de movimiento lineal ( $p \equiv mv$ ).

---

En mecánica clásica no existe ninguna **restricción** respecto a la exactitud del conocimiento de la **posición** y la **velocidad** de un cuerpo. Intuimos que la exactitud dependerá de nuestra capacidad para diseñar el experimento y de la resolución de los instrumentos utilizados en la medición.

Si estudiamos una partícula puntual que tiene movimiento sólo en la dirección cartesiana  $x$ , estaría totalmente caracterizada con el conocimiento de la posición y la velocidad o cantidad de movimiento, como se ve en la figura 1. Y como dijimos antes, no pensamos que  $\Delta x$  o  $\Delta v$  tengan ningún límite predeterminado

$$x = x_0 \pm \Delta x \quad (2)$$

$$v_x = v_{x0} \pm \Delta v_x \quad (3)$$

Para el sentido común, no hay razón para la cual  $\Delta x$ ,  $\Delta v$  o ambas puedan ser cero, **pero para el mundo submicroscópico existe un compromiso**. No es posible disminuir los

errores arbitrariamente, **se debe respetar el principio de incertidumbre**, en el cual:

$$\Delta x m \Delta v \geq h \quad (4)$$

---

La incertidumbre en la medida de la posición de una masa de 1 Kg cuya velocidad tiene una incertidumbre de 1 m/s, es del orden de  $10^{-34}$  m (distancia que es  $10^{-19}$  veces más pequeña que el radio del electrón).

$$\Delta x = \frac{h}{m \Delta v} \sim 10^{-34} m \quad (5)$$

Sin embargo, para un electrón energético en un átomo de hidrógeno, la incertidumbre es del orden de  $10^{-9}$  m, es decir, 10 veces el tamaño adscrito normalmente a los átomos.

$$\Delta x = \frac{h}{m \Delta v} \sim 10^{-9} m, \quad (6)$$

donde  $\Delta v \sim \sqrt{\frac{2E}{m}}$ ,  $E \sim 13$  eV,  $1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19}$  J y  $m = 0.91 \times 10^{-30}$  Kg.

---

El manejo operacional de este principio puede ayudar a estimar la energía de un electrón confinado a moverse en una dimensión. Este resultado será útil cuando se estudie la distribución de los electrones en un sólido.

---

¿Qué energía podrá tener un electrón confinado a moverse en una barra unidimensional de longitud  $L$ ?

Si suponemos que el electrón está en algún lugar de la barra, entonces  $\Delta x = L$ .

Empleando el principio de incertidumbre, el error en la medición de la cantidad de movimiento será  $\Delta p \geq \frac{h}{L}$ . En el mejor de los casos  $\Delta p \sim \frac{h}{L}$ .

Es posible suponer que el error en la medición es menor que la medición en si, por lo que es posible escribir:  $p \sim \frac{h}{L}$ .

Finalmente, con la expresión para la energía cinética se puede escribir la energía que tendría un electrón.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2mL^2} \quad (7)$$

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño -FIAD-

**-Ingeniería en Nanotecnología-**

FOTOELECTRÓNICA

Prof. Dr. E. Efren García G.

## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

### • FÍSICA SUBMICROSCÓPICA

#### • Hipótesis de De Broglie.

Esta afirmación surgió como un modelo para ajustar algunas suposiciones de la mecánica cuántica, cuenta con una amplia justificación experimental. Su representación habitual es:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k; \quad \lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda que caracteriza a un proceso ondulatorio,  $p$  es la cantidad de movimiento lineal y  $k$  es proporcional a la cantidad de movimiento (también es un vector). Al mismo tiempo  $\vec{k}$  es una base vectorial muy usada al estudiar los sólidos, por ejemplo en microscopía electrónica, en propiedades de transporte, etcétera.

Esta hipótesis trata de interrelacionar las características intrínsecas de los fenómenos que son sustancialmente distintos, esto es, relaciona las características de fenómenos ondulatorios ( $\lambda$ ) con las características de fenómenos corpusculares ( $p$ ).

**Con esta hipótesis es posible asociar un comportamiento ondulatorio a las partículas y viceversa.** Esta suposición permite manejar con mayor confianza la mecánica cuántica, ya que se basa en asociar a cualquier cuerpo un comportamiento ondulatorio. De ahí el nombre de mecánica ondulatoria.

Si esto es cierto, ¿cuál es la longitud de onda de una persona?

Si imaginamos una masa de 75 kg y una velocidad de 10 m/s:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{(75)(10)} \left[ \frac{\text{Js}}{\text{kg m s}^{-1}} \right] = 10^{-37} \text{m}$ . Se podría afirmar que esta es una explicación de por qué **no vemos** que las personas se desplacen como ondas, como cuando se perturba la superficie del agua, ya que no se perciben dimensiones físicas tan pequeñas.

¿Qué podemos ver? En nuestro organismo tenemos diferentes transductores y cada uno permite tener acceso a algunos fenómenos que suceden a nuestro alrededor. Por ejemplo:

- Las vibraciones mecánicas de baja frecuencia las detectamos con el tacto.
- Las vibraciones mecánicas de mayor frecuencia las detectamos con el oído.
- La piel nos permite detectar algunas oscilaciones electromagnéticas que corresponden al infrarrojo (calor).
- La vista nos permite discernir entre diferentes oscilaciones de las ondas electromagnéticas, pero en un intervalo muy corto que se denomina “visible”.

---

¿Cuál será la cantidad de movimiento de la luz roja de un láser de He-Ne?

La longitud de onda de este láser es:  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .  $\therefore p = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{632.8 \times 10^{-9}} \sim 10^{-27} [\text{kg m s}^{-1}]$ .

---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño -FIAD-

-Ingeniería en Nanotecnología-

FOTOELECTRÓNICA

Prof. Dr. E. Efren García G.

## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

### • FÍSICA SUBMICROSCÓPICA

#### • Hipótesis de Max Plank.

Sin temor a equivocarnos, podemos afirmar que con el trabajo de Max Plank (1900) dio principio el vertiginoso desarrollo de la física moderna. su hipótesis afirma que, dado que los procesos ondulatorios se pueden comportar como partículas, la luz, al ser una onda electromagnética, también se puede estudiar como un fenómeno corpuscular, y los corpúsculos de luz se denominan **fotones**.

Una fuente de radiación se caracteriza principalmente por su espectro (longitudes de onda que radia) y por la radiancia a cada una de esas longitudes de onda. **Esa hipótesis relaciona expresamente la energía de los fotones ( $E$ ) con la frecuencia ( $\nu$ ) o la longitud de onda ( $\lambda$ ), ya que la frecuencia y la longitud de onda se relacionan con la velocidad de la luz ( $\lambda \nu = c$ ;  $c = 2.9979 \times 10^{10}$  cm/s).**

$$E = h \nu = \hbar \omega \quad (1)$$

---

Esta hipótesis se empleó para explicar los resultados de radiación del cuerpo negro y del efecto fotoeléctrico.

Si se piensa en un conjunto de osciladores acoplados, entonces la emisión o absorción de energía  $E$  es una cantidad proporcional a la frecuencia  $\nu$ . Así, cuando un oscilador absorbe o emite radiación electromagnética, su energía aumenta o disminuye sólo en una cantidad  $h \nu$ ; para cualquier oscilador con frecuencia  $\nu$  existe únicamente una constante de proporcionalidad.

---

¿Qué energía tiene asociada la luz roja del láser de He-Ne,  $\lambda = 632.8$  nm?

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \sim 3.14 \times 10^{-17}[\text{J}] = 1.96[\text{eV}].$$

1eV equivale a la energía que adquiere un electrón después de ser acelerado por una diferencia de potencial de 1volt.

---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño -FIAD-

-Ingeniería en Nanotecnología-

FOTOELECTRÓNICA

Prof. Dr. E. Efren García G.

## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

### • NOMENCLATURA ÓPTICA

El ojo humano, en buenas condiciones de iluminación, es capaz de detectar un pequeño intervalo del espectro electromagnético. En la figura 1 se muestra la respuesta relativa de acuerdo con la Commission Internationale de l'Éclairage en 1924 (CIE).

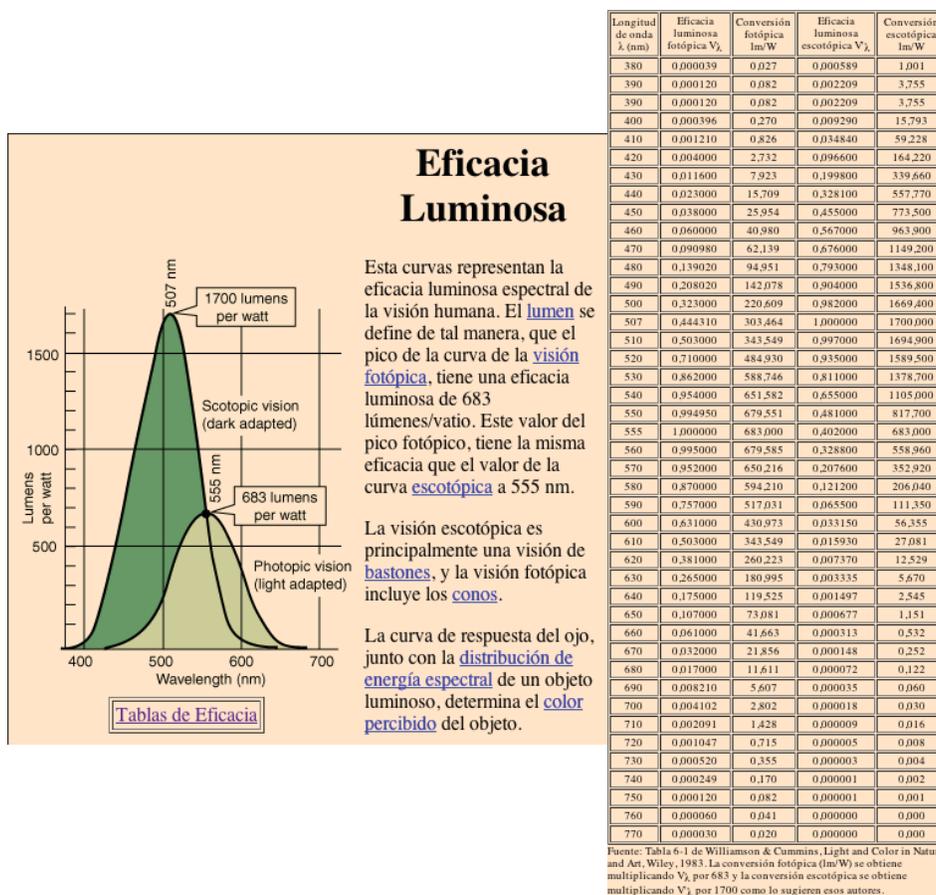


FIG. 1: Eficacia Luminosa

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/vision/photomcon.html#c1>

Esto es lo que da origen a dos conjuntos de unidades para el estudio de la radiación electromagnética: las **radiométricas**, donde la unidad fundamental del flujo radiante es el **watt** y donde no se consideran algunas longitudes de onda como “especiales”, y las **fotométricas**, donde el flujo luminoso equivalente tiene el **lumen** como unidad y están determinadas por la visión.

$$(\text{Flujo luminoso en lm}) = 683 \times (\text{Flujo radiante en W}) \times V_\lambda, \quad (1)$$

donde  $V_\lambda$ , es la respuesta relativa del ojo que tiene el valor de 1 a la longitud de onda de 555 nm que corresponde al color verde. 1 watt de energía radiante equivale a 683 lumen.

- Términos de radiometría y fotometría.

Unidad SI	Término y unidad radiométrica	Término y unidad fotométrica
Q	Energía radiante [J]	Energía luminosa [talbot = lm s]
$\varphi$	Flujo o potencia radiante [W]	Flujo luminoso [lm]
I	Irradiancia [ $\text{W m}^{-2}$ ]	Iluminancia [ $\text{lm m}^{-2} = \text{lux}$ ]
$\mathfrak{R}$	Intensidad radiante [ $\text{W sr}^{-1}$ ]	Intensidad luminosa [ $\text{lm sr}^{-1} = \text{candela}$ ]
L	Radiancia [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ]	Luminancia o brillantez [ $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} = \text{nit}$ ]
W	Emitancia radiante [ $\text{W m}^{-2}$ ]	

Las primeras dos unidades radiométricas no requieren aclaración adicional. La irradiancia es una medida de la cantidad de radiación (potencia radiante) por unidad de área; a menudo el detector no define el área iluminada, así que debe corregirse proporcionalmente. La intensidad radiante es medida en fuentes divergentes y mide la potencia radiada por una fuente puntual como función del ángulo sólido. La radiancia es una propiedad de superficies que emiten o reflejan la radiación y miden la potencia radiada por unidad de área y ángulo sólido definido entre el detector puntual y el área emisora o reflectora. La emitancia radiante mide la portencia total radiada en todas direcciones a partir de un área unitaria.

---

¿Cuál es la brillantez de un diodo emisor de luz (LED)?

Empezemos por suponer un LED fabricado con un área activa de 0.2 mm de diámetro y que es visto a un metro de distancia. El LED emite una longitud de onda de 550 nm

(verde) y tiene una eficiencia cuántica externa ( $\eta$ ) de 0.1% (este número mide la razón de electrones que son convertidos en fotones; los LED amarillos tienen un peor número mientras que los infrarrojos alcanzan eficiencias de 15 %). Además, supongamos que emite de manera isotrópica y que el diodo es operado a 2 V y 50 mA.

En estas condiciones el LED se puede trabajar como una fuente puntual, ya que el ángulo creado por el área del LED a un metro de distancia es menor a un minuto de arco.

La potencia radiante total está definida por la energía proporcionada por cada fotón emitido (función de  $\lambda$ , y que posteriormente se verá que depende de la estructura de bandas), por los electrones disponibles para producir fotones (función de la corriente eléctrica) y por la eficiencia de conversión electrón-fotón ( $\eta$ ).

$$W = \frac{hcI}{\lambda e} \eta = \frac{hc}{550 \times 10^{-9}} \frac{50 \times 10^{-3}}{e} 0.001 = 1.13 \times 10^{-4} [\text{W}] \quad (2)$$

De la tabla CIE a esta longitud de onda, un watt es igual a 679 lm, por lo que el LED produce una potencia luminosa de  $7.7 \times 10^{-2}$  lm. Como el flujo luminoso es isotrópico sobre el ángulo de  $2\pi$  la intensidad luminosa a incidencia normal es de  $1.2 \times 10^{-2}$  candela.

La definición de ángulo sólido es similar a la definición del radian; el radian es el cociente de la longitud de arco de un círculo entre el radio del círculo. El estereorradian (sr) es el cociente del área de una sección de la esfera entre el radio de la esfera al cuadrado. El ángulo sólido total de una esfera es  $4\pi$ . Una abertura rectangular  $a \times b$ , a una distancia  $h$ , forma un ángulo sólido ( $\Omega$ ) de la siguiente forma:

$$\Omega = 4 \arctan \frac{ab}{2h \sqrt{a^2 + b^2 + (2h)^2}} \quad (3)$$

- Polarización de la luz

El concepto de polarización de la luz es muy importante, ya que muchos dispositivos ópticos controlan y miden la polarización de la luz más que la intensidad. Las memorias magnetoópticas, por ejemplo, se basan en la identificación de pequeños dominios magnéticos ana-

lizando la polarización que se refleja del material, ya que cambios en el material magnético producen cambios en la polarización de la luz (efecto Kerr magnético).

La radiación electromagnética se caracteriza, además de lo mencionado en la sección anterior, por la propagación del frente de onda y el estado de polarización. La propagación del frente de onda puede ser plana, como la luz del sol vista en una pequeña área en la tierra. Otro caso de propagación puede ser esférica, como las fuentes puntuales, y finalmente las fuentes gaussianas, como la radiación de los láseres de buena calidad, donde la intensidad se distribuye en el espacio como una campana de Gauss.

La polarización de la radiación puede ser plana, en la cual el vector del campo eléctrico vibra paralelo a un plano que incluye la dirección de propagación. La polarización circular se produce cuando en la radiación que se propaga en la dirección cartesiana  $z$ , la vibración del campo eléctrico a lo largo del eje cartesiano  $x$  está a un cuarto de la longitud de onda fuera de fase respecto a la vibración del campo eléctrico a lo largo del eje cartesiano  $y$ , y el campo eléctrico resultante describe un círculo. Si la diferencia de fase es 0 o la mitad de la longitud de onda, se tiene polarización plana. Cualquier diferencia de fase diferente a las anteriores se conoce como polarización elíptica. La reflexión de la radiación de cualquier material modifica la polarización de la radiación. La transmisión de la radiación en un material cristalino altera su polarización por birrefringencia o por dicroísmo, como los polaroid.

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño -FIAD-

**-Ingeniería en Nanotecnología-**

FOTOELECTRÓNICA

Prof. Dr. E. Efren García G.

## 1. CONCEPTOS PRELIMINARES

### • MECÁNICA CUÁNTICA

La mecánica cuántica es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles, en particular lo que sucede a escala atómica. A longitudes muy pequeñas las cosas se comportan de manera muy diferente de cualquiera que ustedes hayan visto. No se comportan como ondas ni como partículas ni como nubes ni nada parecido.

¿**Cómo sabemos que la mecánica cuántica dice la “verdad”?** Recordemos un comentario tomado de una idea del profesor Carl Sagan. Los filósofos jónicos, Platón, Demócrito y otros, tenían conceptos científicos similares a los aceptados actualmente como verdaderos. La Edad Media se encargó de destruir ese conocimiento y el Renacimiento de redescubrirlo; desde el punto de vista científico, continuamos en el Renacimiento por sus puntos de vista antidogmáticos. Los jónicos nunca pudieron probar realmente sus afirmaciones acerca de la existencia del átomo, que era un concepto muy revolucionario, pero desde el punto de vista de la verdad, es tan disparatado como suponer que todo está formado por tierra-aire-fuego-agua. Esto fue así por que los jónicos pensaban que el trabajo experimental era trabajo manual, sólo apto para los esclavos. Hoy día muchas sociedades han superado esta etapa. Entonces, ¿las verdades científicas actuales están en peligro de ser superadas y olvidadas? No, al menos desde el punto de vista numérico. Desde el punto de vista filosófico, se espera que la interpretación actual esté incompleta, pero no equivocada. Esta afirmación sugirió de la verificación experimental que se hace de sus verdades. Algunos de los acontecimientos más sobresalientes en el desarrollo de la mecánica cuántica son:

Radiación del cuerpo negro	1901	Plank
Efecto fotoeléctrico	1905	Einstein
Espectos atómicos	1913	Bohr
Dispersión de fotones por electrones	1922	Compton
Principio de exclusión	1924	Puli
La materia como onda	1925	De Broglie
Ecuación de onda	1926	Schrödinger
Principio de insertumbre	1927	Heisenberg
Propiedades ondulatorias del electrón	1927	Davisson y Germer
Interpretación física de la función de onda	1927	Born

- Ecuación de Schrödinger

Ideas

1. A toda partícula se le asocia una función de onda compleja:

$$\Psi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

2. La expresión clásica de la energía total, hamiltoniano (energía cinética + energía potencial) se transforma en la ecuación básica por medio de los siguientes operadores:

<i>Variable dinámica</i>	<i>Operador asociado</i>
Posición: $x, y, z$	$x, y, z$
Cantidad de movimiento lineal: $p$	$\frac{\hbar}{i} \nabla$
Energía: $E$	$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t}$
Ecuación de movimiento: $E = \frac{p^2}{2m} + V(x, y, z)$	$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(x, y, z) \Psi$

Donde  $V(x, y, z)$  es la energía potencial y  $\nabla^2$  representa al operador de Laplace.

3. Las cantidades  $\Psi$  y  $\nabla \Psi$  deben ser finitas, univaluadas y continuas, para cualquier  $x, y, z$  y  $t$ , además de tender a cero en  $\pm\infty$ .

4.  $\Psi^*\Psi$  es siempre real y se interpreta como la densidad de probabilidad ( $\Psi^*$  es el conjugado de  $\Psi$ ). Por lo que al integrar sobre todo el espacio debe ser igual a uno.

$$\int_V \Psi^*\Psi dV = 1 \quad (2)$$

$\Psi^*\Psi$  es la probabilidad de que la partícula se encuentre dentro del elemento de volumen  $dV$  en el instante  $t$ . Ésta es toda la información que se puede obtener de  $\Psi$ .

5. El valor promedio de  $\langle \beta \rangle$  de cualquier variable dinámica  $\beta$  se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \langle \beta \rangle &= \int_V \Psi^* \beta_{operador} \Psi dV \\ \langle x \rangle &= \int_V \Psi^* x \Psi dV \\ \langle p \rangle &= \int_V \Psi^* \frac{\hbar}{i} \nabla \Psi dV \end{aligned} \quad (3)$$

A continuación se presenta una justificación de la ecuación de Schrödinger como una ecuación de conservación de la energía. Si se parte de la suposición de que cualquier partícula puede ser tratada como una onda, entonces es posible tener una función ondulatoria que varía en el tiempo y en la posición de la siguiente manera:

$$\Psi = A e^{i(kx - \omega t)} \quad (4)$$

Si se sustituyen los valores de  $k$  y de  $\omega$  con las relaciones de Planck y de De Broglie, se obtiene que:

$$\Psi = A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} \quad (5)$$

En un sistema clásico la energía total es la suma de la energía cinética y potencial, expresada de la siguiente manera:

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(x, y, z)$$

Obteniendo la expresión para  $p^2$  y  $E$  a partir de la ecuación (5), derivando la ecuación dos veces respecto a la posición para obtener  $p^2$  y derivando respecto al tiempo para obtener  $E$ , finalmente se obtiene la ecuación de movimiento (ésta no es una deducción).

$$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(x, y, z) \Psi \quad (6)$$

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

## FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO INGENIERÍA EN NANOTECNOLOGÍA

### -FOTOELECTRÓNICA-

Dr. E. Efrén García G. .

#### TAREA

1. Explique si un “cuerpo negro” siempre se ve negro.
2. Explique por qué un pedazo de metal se pone incandescente con un color rojo brillante a 1100 K; sin embargo, a esta misma temperatura, un pedazo de cuarzo simplemente no brilla. (Sugerencia: relacione este problema con la radiación de cuerpo negro.)
3. Usando el modelo del átomo de hidrógeno, diga: ¿Cuál es la frecuencia y energía de luz requerida para ionizar al electrón desde el estado base? ¿Cuál sería la frecuencia y energía de la luz para mover el electrón del estado  $n = 2$  al siguiente nivel de energía ( $n = 3$ )? En cada caso, diga el color de la luz.
4. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones describe mejor la esencia física del principio de incertidumbre?
  - (a) Todas las mediciones de  $x$  o  $p$  son inexactas.
  - (b) Es imposible medir con un error arbitrario simultáneamente dos variables conjugadas  $x$  y  $p$ .
  - (c) Es imposible medir correctamente  $x$  y  $p$ .
  - (d) Los incrementos de  $x$  y  $p$  son mayores o iguales que  $h$ .
  - (e) El error en la medición de  $x$ , al igual que en el de la medición de  $p$ , siempre es diferente de cero.
5. ¿Cuál es la mínima frecuencia de la luz que causaría fotoemisión de un metal con función trabajo de 2.4 eV? ¿Cuál es la máxima energía cinética de un electrón fotoemitido con luz de 300 nm de longitud de onda?
6. Un electrón en un microscopio electrónico se acelera por un voltaje de 25 kV. ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie?
7. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones da cuenta de la explicación para la cuantización de energía?
  - (a) Si las masas son pequeñas, la energía está cuantizada.
  - (b) Si el sistema está ligado, la energía está cuantizada.
  - (c) La periodicidad de la función seno.
  - (d) El valor de  $h$ .
8. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones da cuenta del efecto túnel?

- (a) Es resultado de que la partícula esté confinada.
  - (b) Si se tiene un potencial suficientemente pequeño y una  $x$  suficientemente pequeña, entonces existe el efecto túnel.
  - (c) Todas las partículas confinadas pueden tunear su confinamiento.
  - (d) Toda partícula puede atravesar barreras de potencial siempre y cuando su energía sea una fracción del potencial de la barrera.
  - (e) El valor de la densidad de probabilidad  $\Psi\Psi^*$ .
9. Se tiene un arreglo similar al de un cine: fuente de luz, pantalla, espectador. Compare una fuente incandescente isotrópica y un laser que recorre periódicamente toda la pantalla rectangular de  $4 \times 8$  metros. ¿Qué relación de potencia radiante deben tener las fuentes para que produzcan la misma irradiancia sobre la pantalla? ¿Qué relación existe entre la potencia radiante de una fuente isotrópica y el flujo radiante que recibe el espectador, si la pantalla está a 40 metros de la fuente y el espectador está a 20 metros de la pantalla? Suponga que se refleja 25% en la pantalla y que la fuente y el espectador están en la dirección de la línea normal al plano de la pantalla.