

## SESIÓN 13

### TEORÍA CUÁNTICA

#### I. CONTENIDOS:

1. Antecedentes históricos de la teoría cuántica.
2. Surgimiento de la teoría cuántica.
3. Efecto fotoeléctrico.
4. Dualidad onda partícula.
5. Principio de incertidumbre.

#### II. OBJETIVOS:

Al término de la Sesión, el alumno:

- Analizará la teoría cuántica.
- Conocerá e interpretará los principios derivados de la teoría cuántica.
- Describirá el efecto fotoeléctrico.

#### III. PROBLEMATIZACIÓN:

*Comenta las preguntas con tu Asesor y selecciona las ideas más significativas.*

- ¿Cómo se transmite el calor de una flama?
- ¿Cómo se prende el alumbrado público?
- ¿Cómo se pudiera conocer la posición de un electrón?
- ¿Por qué una celda fotoeléctrica debe orientarse al norte?

#### IV. TEXTO INFORMATIVO-FORMATIVO:

##### **1.1. Antecedentes históricos de la teoría cuántica**

Un cuerpo negro es un objeto teórico que absorbe toda la luz que incide sobre él, sin embargo eso no significa que no emita radiación electromagnética, la radiación que emite depende de la temperatura que tenga el cuerpo negro. En 1814 el físico alemán Joseph von Fraunhofer comenzó con el estudio de las líneas de absorción del espectro de la luz solar, pudiendo describir 570 líneas. En 1859 Gustav Kirchhoff, un físico nacido en la antigua Prusia estudió con más detalle los espectros de líneas de absorción y pudo demostrar que cada elemento tenía características propias en su espectro. Junto con Robert Bunsen, un químico alemán pudo identificar elementos químicos en el sol estudiando su espectro. Describió que la radiación de un cuerpo negro, si está en equilibrio termodinámico con su entorno, es igual a la capacidad que tiene para absorber energía luminosa.

La física clásica ofrecía algunas explicaciones sobre la radiación de un cuerpo negro, considerando a la luz como una onda. Una de esas explicaciones era la Ley de Stefan-Boltzmann (1884), que relacionaba la intensidad de la emisión de un cuerpo negro con la cuarta potencia de su temperatura. Luego Wilhelm Wien, físico prusiano, en 1892, propuso una distribución de las frecuencias de radiación, sólo que no coincidía con valores de frecuencias bajas. En 1900 Lord Rayleigh, propuso un modelo para la explicación de la radiación de cuerpo negro, que coincidía con los datos experimentales en la zona de bajas frecuencias, donde fallaba la explicación de Wien; pero el problema era que al aumentar la frecuencia, por ejemplo, la de la luz ultravioleta, la radiación de cuerpo negro se incrementaba hasta valores que violaban la ley de la conservación de la materia. Había que dar una nueva explicación para la radiación de un cuerpo negro.

## 2.1. Surgimiento de la teoría cuántica

En 1889, un alumno de Kirchhoff, fue nombrado su sucesor en la cátedra de física de la Universidad de Berlín. Era un alemán de nombre Max Planck. Se interesó por el problema de la radiación de cuerpo negro. Resolvió el problema tomando como base la segunda ley de la termodinámica e hizo una interpolación matemática de las propuestas de Wein y Rayleigh para la radiación de cuerpo negro. La fórmula obtenida por Planck, fue verificada y coincidía con los resultados experimentales. Planck se vio forzado a dar una explicación a su afortunada fórmula que explicaba la radiación de cuerpo negro.

$$E = hf \quad \text{donde } h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Finalmente Planck estableció que la energía que emite cada electrón en un cuerpo negro es un múltiplo entero de una energía característica relacionada con la frecuencia. El resultado de esto es que la energía se emite en paquetes llamados cuantos (del latín quantum que representa la cantidad de algo). En 1920 recibió el premio nobel de Física.

La Teoría Cuántica fue utilizada por Niels Bohr en 1913, al interpretar el espectro del hidrógeno y con ello formular un modelo sobre la estructura electrónica de los átomos. Según la física clásica los electrones deberían emitir luz de frecuencia igual a la de su rotación en torno del núcleo del átomo, pero esto haría que la trayectoria del electrón se modificara continuamente acercándose al núcleo por la constante emisión de energía. Además los electrones deberían formar un espectro continuo.

Pero el espectro del hidrógeno ni es continuo; ni los electrones del hidrógeno pierden energía hasta ser atraídos por los núcleos atómicos. Bohr postuló que los electrones pueden absorber o emitir energía en paquetes  $hf$ ; la menor energía posible del átomo corresponde a su estado fundamental. Cuando el átomo recibe energía foránea, el electrón la absorbe y pasa a un estado excitado en el que el electrón orbita en una trayectoria más alejada del núcleo pero no inmediata a la que tenía. Esto significa que la luz que emiten los electrones no es continua sino que presenta interrupciones como se aprecia en el espectro de líneas del hidrógeno. Descubrió que había una serie de posiciones posibles de los electrones en torno del núcleo, a estos lugares hoy se les conoce como niveles cuánticos. Calculó también la energía correspondiente a cada nivel cuántico, su radio y la velocidad de los electrones en cada uno.

### 3.1. Efecto fotoeléctrico

En el año de 1887 el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, descubrió que podía inducir la descarga eléctrica entre dos esferas cargadas si se les iluminaba con luz ultravioleta. En 1898 J.J. Thomson, descubrió que cuando se ilumina a una placa de zinc con luz ultravioleta, la placa emite cargas eléctricas negativas. Esto significa que con la luz ultravioleta el zinc desprende electrones. Se dispuso sobre un electroscopio una placa de zinc y al incidir luz ultravioleta sobre ella el electroscopio se cargaba negativamente. Si el electroscopio tenía ya carga negativa, las hojas se cerraban, pero si se cargaba previamente el electroscopio con carga positiva las hojas de abrían más. De este modo se demostró que la placa desprendía siempre cargas negativas (electrones).

La emisión de electrones cuando una placa de zinc u otro material es iluminada con luz ultravioleta se llama efecto fotoeléctrico. Otras radiaciones electromagnéticas como los rayos X también pueden generar el efecto fotoeléctrico. La luz visible no puede producir el efecto fotoeléctrico en el zinc, se estudió la longitud de onda máxima que puede generar el efecto fotoeléctrico y se le llamó umbral fotoeléctrico. Después se probó con otros metales encontrando que los metales alcalinos tienen un umbral situado en la región de la luz visible.

Se observó que la energía cinética de los electrones emitidos depende de la frecuencia de la luz. Sin embargo, la teoría ondulatoria de la luz no podía explicar el efecto fotoeléctrico. Según la teoría clásica, la energía de una onda se relaciona con su amplitud y no con su frecuencia; si la energía de las ondas de luz ultravioleta se transfería a los electrones del metal para que se desprendieran, entonces con una intensidad luminosa considerable deberían desprenderse electrones aunque la frecuencia de la luz fuera baja. Pero las observaciones del efecto no constataban las predicciones teóricas. Además, según la teoría ondulatoria, debería retrasarse la emisión de electrones pues un electrón necesita mucho tiempo para adquirir la energía suficiente y con ella desprenderse del metal; otra vez las observaciones no eran coherentes con la teoría, la emisión de electrones en el efecto fotoeléctrico eran instantáneas.

Este fenómeno al fin pudo ser explicado, en 1905, por Einstein. Utilizando la Teoría Cuántica, postuló que la luz está formada por paquetes de energía que corresponden al producto de la frecuencia de la luz por la constante de Planck; que la energía de esos paquetes llamados “cuantos” o “fotones” se transfiere a los electrones y una parte de esa energía se emplea para que los electrones se desprendan del metal y el resto se transforma en la energía cinética de los electrones emitidos. En 1912, Millikan utilizó diferencias de potencial (voltaje) para impedir que se presentara el efecto fotoeléctrico a fin de probar la ecuación de Einstein, el resultado fue positivo pero además pudo calcular con una mayor precisión la constante de Planck.

$$hf = E_1 + \frac{mv^2}{2}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $f$  la frecuencia de la luz,  $E_1$  la energía que se requiere para desprender el electrón del metal,  $m$  la masa del electrón, y  $v$  la velocidad del electrón.

#### 4.1. Dualidad onda partícula

Hasta 1924 se pensaba que los electrones eran corpúsculos o partículas extremadamente pequeñas, pero el físico francés Louis de Broglie a través de su trabajo para su tesis doctoral descubrió que según la Teoría Cuántica, podían observarse analogías entre las propiedades de los electrones y los fotones si a los electrones en movimiento se les asignaba una longitud de onda.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Según esta ecuación, un electrón en reposo tiene una longitud de onda infinita, misma que va disminuyendo al aumentar la velocidad del electrón. De Broglie observó que la longitud de onda del electrón tiene el valor preciso para generar un refuerzo en las ondas de las órbitas electrónicas que había descrito Bohr. De este modo se forman ondas estacionarias que permiten que sea posible la presencia de un electrón en ese lugar del espacio en torno del núcleo atómico. Para valores ligeramente mayores o menores, la longitud de onda de los electrones no formaría ondas estacionarias pues se produce interferencia. Entonces, la teoría ondulatoria del electrón permite entender que los electrones sólo pueden estar en determinadas regiones del espacio alrededor del núcleo, porque en los demás sitios no se forman ondas estacionarias que permitan la estabilidad de los electrones.

Los físicos C. J. Davisson y G. P. Thomson se dedicaron a difractar electrones y obtuvieron patrones de difracción semejantes a los de los rayos X, además calcularon la longitud de onda y ésta coincidió con la que propone la ecuación de De Broglie.

Ahora se acepta que los electrones son simultáneamente onda y partícula.

### 5.1. Principio de incertidumbre

Para localizar algún objeto, utilizamos la luz. La luz es una forma de energía radiante que consiste en un rayo de fotones o un tren de ondas. La luz, en algunos fenómenos se comporta como onda y en otros se comporta como partícula; tal como ya se ha mencionado, la luz tiene una naturaleza dual, es onda y partícula a la vez. Los fotones que iluminan un objeto grande no le cambian su estado de movimiento; la luz del sol que ilumina un ave en vuelo, no le provoca una mayor o menor velocidad, es que la masa del ave es demasiado grande para ser afectada por la radiación luminosa. La posición y la rapidez de un avión en vuelo, se localiza mediante las ondas de radio que emite y recibe, ya reflejadas en el avión, un radar.

Pero una partícula tiene una masa extremadamente pequeña y la luz que incide en ella le cambia su estado de movimiento; la luz que absorbe una partícula se transforma en otra forma de energía en la partícula.

Para localizar un electrón debemos utilizar alguna forma de energía radiante, pero cuando un fotón rebota con un electrón le transfiere un impulso que lo desvía. Si queremos localizar con la máxima precisión la posición de un electrón debemos utilizar ondas de la menor longitud posible; pero al emplear energía con longitud de onda reducida, se transfiere al electrón una mayor energía y es mayor el impulso; el resultado es que se tiene una pérdida de precisión en la medida de la velocidad.

Esta condición, llevó al físico alemán Werner Heisenberg en 1927 a postular que cuanto más exacta pretende ser la medición de la posición menos exacta es la medición de la velocidad del electrón, y viceversa. En el mundo ordinario las mediciones de posición y velocidad son muy grandes comparadas con la constante de Planck. Tal como se ha dicho, la constante de Planck es un valor extremadamente pequeño y para mediciones ordinarias no se exige tanta precisión. Sin embargo, en el mundo subatómico, es necesario tener precisiones del orden de la constante de Planck, y es aquí donde se presenta la imposibilidad de medir simultáneamente la velocidad y la posición de un electrón con una precisión acorde al tamaño de la partícula.

Heisenberg interpretó que si la mecánica cuántica no permite la medición de la velocidad y la posición de las partículas subatómicas, y como lo que no se puede medir no existe, entonces las partículas subatómicas no tienen posición ni velocidad determinados; por tanto no tienen trayectoria.