B.FISICA CUANTICA

B.1. INTRODUCCION A LA FISICA CUANTICA

En la unidad IV ya hablamos del concepto que se tiene sobre la naturaleza de la luz. Además estudiamos algunos fenómenos que nos demuestran que la luz tiene características ondulatorias o sea que se comporta como una onda electromagnética. Entre estos fenómenos tenemos la interferencia, la difracción y la polarización.

Este concepto acerca de la luz como una onda electromagnética corresponde a finales del siglo XIX. Vamos a ver ahora como apareció en la Física un concepto más moderno a través del surgimiento de una nueva rama de la Física Moderna: la Física Cuántica.

A finales del siglo XIX se comenzaron a estudiar una serie de nuevos fenómenos, en los que la luz participa, que convencieron a algunos científicos de la época, de la necesidad de modernizar el concepto de la luz. Vamos a revisar algunos de estos fenómenos.

B. 2. RADIACION TERMICA:

El primer fenómeno que impuso la necesidad de revisar una vez más el concepto de la luz fue la radiación térmica.

Todos conocemos que los cuerpos emiten radiación y que ésto depende fundamentalmente de la temperatura del cuerpo. A mayor temperatura, mayor radiación emitirá el cuerpo.

La cantidad de energía por unidad de tiempo que emite la superficie de un cuerpo depende además del estado de la superficie (rugosa o lisa) y del color de la misma. Así los cuerpos de color obscuro o negro emiten más energía y los de color claro emiten menos energía, estando a igual temperatura. Esto está relacionado con la absorción por parte del cuerpo de la radiación que incide sobre él. Los cuerpos obscuros absorben más y por ello emiten más, los cuerpos claros absorben menos y por ello emiten menos.

Se define de esta forma el cuerpo negro como aquel cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y por ello es el cuerpo que más radiación emite, por lo que también se le llama radiador o emisor ideal.

A finales del siglo XIX fue estudiada la forma en que un cuerpo negro emitía la radiación, basándose en el concepto de que la luz era una onda electromagnética; pero los investigadores no pudieron, partiendo de esta hipótesis, explicar correctamente los resultados experimentales que se tenían.

En el año 1900 el científico alemán Max Planck introdujo una nueva hipótesis, muy revolucionaria para aquella época, que planteaba que la radiación era emitida no en forma de ondas electromagnéticas sino en forma de paquetes de energía, a los que él llamó "cuantos"

Planck consideró que el cuerpo negro estaba constituido por cierto número de osciladores pero que cada uno de ellos solo podía emitir una energía igual a un número entero de cuantos:

$$E = n\varepsilon \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

donde n es el número de cuantos y la energía de cada cuanto es:

$$\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

donde h es una nueva constante llamada la constante de Planck y ν es la frecuencia de la radiación.

O sea que aquí Planck introdujo conceptos nuevos en la Física de aquel tiempo como el concepto de "**cuanto**" y el hecho de que la radiación fuera emitida en forma de paquetes de energía y no en forma de ondas electromagnéticas. Aquí es donde se puso de manifiesto que la radiación se emitia en forma de un haz de cuantos o sea tenía naturaleza corpuscular y no ondulatoria.

A partir de estas hipótesis, Planck pudo explicar correctamente los resultados experimentales de la radiación del cuerpo negro y dado el concepto de cuanto de energía que introdujo, se considera que ésto da inicio a la **Física Cuántica**. Por este trabajo Max Planck obtuvo el Premio Nobel de Física en 1918.

Notemos sin embargo que Planck sólo nos habló del hecho de que la radiación, y por tanto la luz, es emitida en forma de cuantos, pero no dijo nada en cuanto a su **absorción** o su **propagación** ¿Será posible que en estos fenómenos también esté presente la naturaleza cuántica, corpuscular de la radiación ?
Sobre estos aspectos hicieron sus aportes otros científicos al estudiar otros fenómenos.

Ejemplo 1. ¿ Cuál es la energía de los fotones de un rayo de luz que tiene una longitud de onda de 540 nm (luz verde)?

$\lambda = 540\ nm = 540 \times 10^{-9} m$

$h = 6.6 \times 10^{-9}\ J.s$

$c = 3 \times 10^{8} m/s$

La energía de un fotón de luz de frecuencia ν es :

$$E = h\nu$$

el dato que se tiene es la longitud de onda que es igual a :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \qquad de\ donde\ \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3x10^{8}\frac{m}{s}}{540x10^{-9}m} = 5.55x10^{14}\,Hz$$

por lo tanto

$$E = h\nu = \left(6.6x10^{-34}\,J.s\right)\left(5.55x10^{14}\frac{1}{s}\right)$$

$$E = 3.666x10^{-19}\,J$$

Ejemplo 2. ¿ Cuáles fotones tienen más energía, los de un rayo de luz ultravioleta de 300nm de longitud de onda o los de un rayo de luz roja de 700 nm de longitud de onda?

$\lambda_{uv} = 300nm = 300X10^{-9}\,m = 3X10^{-7}\,m$

$\lambda_{roja} = 700nm = 700X10^{-9}\,m = 7X10^{-7}\,m$

La energía de un fotón es igual a :

$$E = h\frac{c}{\lambda}$$

Por lo tanto, para la luz ultravioleta

$$E_{uv} = h\frac{c}{\lambda} = \left(6.66x10^{-34}\,J.s\right)\left(\frac{3x10^{8}\,\frac{m}{s}}{3x10^{-7}\,m}\right)$$

$$E_{uv} = 6.6x10^{-19}\,J$$

para la luz roja:

$$E_{roja} = h\frac{c}{\lambda} = \left(6.66x10^{-34}\,J.s\right)\left(\frac{3x10^{8}\,\frac{m}{s}}{7x10^{-7}\,m}\right)$$

$$E_{uv} = 2.82x10^{-19}\,J$$

De aquí vemos que los fotones del ultravioleta poseen más energía que los del rojo. Por ello se plantea la necesidad de protegernos de la acción de los rayos ultravioleta.

B.3 EFECTO FOTOELECTRICO:

Seguramente has utilizado muchas veces una calculadora que no necesita baterias y es posible te hayas preguntado: ¿ De dónde sale la energía que necesita para funcionar?. Quizás también te hayas preguntado: ¿ De dónde sale la energía que utilizan las naves espaciales? como el trasbordador Discovery, durante el vuelo para mantener funcionando los equipos de la nave y garantizar la vida de la tripulación. Pues en ambos casos se utiliza la energía de la luz para producir energía eléctrica. Vamos a ver cómo son las características de este proceso.

A finales del siglo XIX se descubrió y estudió el Efecto Fotoeléctrico. Este fenómeno consiste en que al incidir radiación (luz) sobre un material, generalmente un metal, éste emite electrones. A estos electrones se les llama fotoelectrones ya que son liberados del metal por la acción de la luz. O sea este fenómeno corresponde a la absorción de la luz por un material, por lo que su estudio tenía gran importancia porque permitía aclarar cómo era el comportamiento de la luz en estas condiciones.

Los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico, obtenidos mediante la instalación mostrada, en la figura 4, pueden ser resumidos de la siguiente forma:

1. El número de los fotoelectrones emitidos es proporcional a la intensidad de la luz incidente.
2. La energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de su frecuencia.
3.-El efecto no se produce para cualquier frecuencia de la luz incidente, sino para frecuencias mayores que cierto valor ν llamado frecuencia de corte o umbral.

4. La emisión de los fotoelectrones es instantánea luego de la incidencia de la luz. El tiempo que transcurre entre la incidencia de la luz y la emisión es del orden de 10^{-8} segundos.

Partiendo de la suposición de que la luz es una onda electromagnética, de estos 4 resultados experimentales sólo puede explicarse el número 1. Los otros 3 resultados no son explicados partiendo de esta suposición.

En 1905 el físico alemán Albert Einstein publicó un trabajo donde explicaba todos los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico.

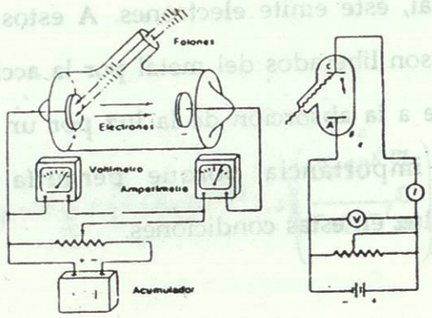


Figura 4. Instalación experimental para el estudio, del efecto fotoeléctrico.

Einstein partió del trabajo anteriormente expuesto por Planck y postuló que la luz es un haz de cuantos, en la actualidad conocidos como fotones, cada uno con una energía E igual a:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

donde: h: la constante de Planck

c: la velocidad de la luz en el vacío

ν: la frecuencia de la luz

λ :la longitud de onda

Planck nos había planteado que la luz se emitía en forma de cuantos, Einstein amplió esta idea y postuló que la luz no sólo se emite sino que se propaga y absorbe en forma de cuantos o fotones, generalizando de esta forma la naturaleza corpuscular, cuántica o fotónica de la luz.

A partir de ésto y según la explicación de Einstein el efecto fotoeléctrico ocurre de la siguiente forma:

-El haz de fotones llega a la superficie del metal, cada uno llevando una energía $E = h\nu$.

-Cada fotón interactúa con un electrón del metal y le entrega su energía.

-Cada electrón utiliza la energía que recibe en 2 procesos

1. Escapar del metal, para lo cual requiere gastar cierta cantidad de energía ϕ , llamada función de trabajo.

2. Moverse con una determinada energía cinética E_k.

De manera que podemos plantear la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico de la siguiente forma:

$$h\nu = E_k + \phi = \frac{1}{2} m_o v^2 + \phi$$

De esta ecuación podemos entender perfectamente los resultados experimentales anteriormente expuestos, ya que se ve que la energía cinética de los electrones depende de la frecuencia de la luz y no de la intensidad, además si la energía de los fotones $E = h\nu$ es menor que la función de trabajo ϕ los electrones no pueden salir del metal, pues no les alcanza la energía, y por ello no ocurre el efecto fotoeléctrico.

Ciertos experimentos fueron realizados por Robert Millikan en 1915 y de ellos se obtuvo el valor de h. En la actualidad el valor más exacto de la constante es:

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ J.s$$

De esta manera del estudio del efecto fotoeléctrico se pudo concluir que el comportamiento de la luz en procesos de absorción es corpuscular o cuántico. El trabajo de Albert Einstein de este efecto fue galardonado con el Premio Nobel de Física en el año 1921.

Como ya vimos al principio el efecto fotoeléctrico tiene una gran importancia práctica. Permite producir energía eléctrica a partir de la luz, permite construir equipos para medir la intensidad de la luz, se diseñan dispositivos basados en este efecto que reaccionan ante la presencia de luz, como alarmas o sistemas de seguridad etc. Todo esto lo tenemos a nuestro servicio gracias al trabajo de muchos científicos que han dedicado su vida al estudio de éste y otros fenómenos.

Otros fenómenos estudiados posteriormente confirmaron el hecho de que la luz posee características corpusculares. Entre ellos el efecto Compton, un proceso de interacción de los fotones con electrones, sin absorción, y en el cual los fotones se comportan como las bolas de billar.

Ejemplo 3. La función de trabajo para el tungsteno es de 7.232×10^{-19} J (4.52eV). Si se ilumina una superficie de este metal con luz de frecuencia 1.5×10^{15} Hz, a) ¿ Cuál será la energía cinética máxima de los electrones emitidos ? b) Determine la frecuencia de corte y la longitud de la onda de corte de este metal.

$\phi = 7.232 \times 10^{-19}\ J$

$\nu = 1.5 \times 10^{15}\ Hz$

$1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$

a) Según la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = E_k + \phi$$

$$E_k = h\nu - \phi$$

$$E_k = \left(6.66 \times 10^{-34}\ J.s\right)\left(1.5 \times 10^{15}\ \frac{1}{s}\right) - \left(7.232 \times 10^{-19}\ J\right)$$

$$E_k = 2.668 \times 10^{-19}\ J$$

b) La frecuencia del corte queda determinada por la ecuación de Einstein cuando $E_k = 0$, o sea:

$$h\nu = E_k + \phi$$

$$h\nu_o = \phi$$

o sea:

$$\nu_o = \frac{\phi}{h} = \frac{7.232x10^{-19}\,J}{6.6x10^{-34}\,\frac{J}{s}}$$

$$\nu_o = 1.095x10^{15}\,Hz$$

El significado de este valor es que si la frecuencia de la luz incidente es menor que $1.095x10^{15}$ Hz no se produce el efecto fotoeléctrico en el tungsteno, pues la energía de los fotones es menor que la función de trabajo del metal. Asociada a la frecuencia de corte se designa una longitud de onda de corte o umbral λ_o

$$\lambda_o = \frac{c}{\nu_o} = \frac{3x10^8\,\frac{m}{s}}{1.095x10^{15}\,\frac{1}{s}} = 2.739x10^{-7}\,m$$

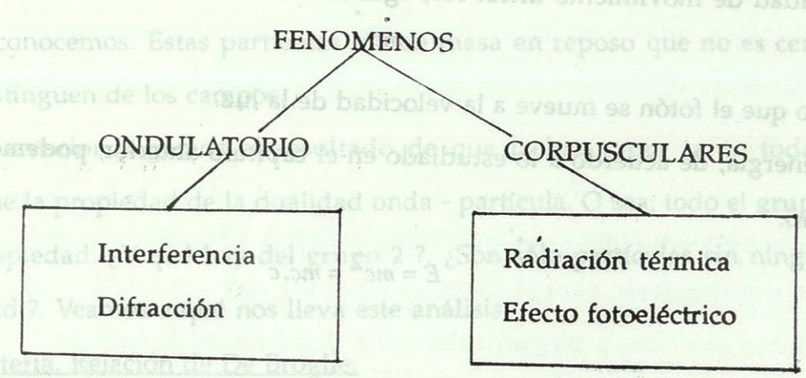
$$\lambda_o = 273.9\,nm$$

Su significado es el mismo, si la longitud de onda de la luz

incidente es mayor que este valor, no ocurrirá el efecto fotoeléctrico en el tungsteno.

B. 4. DUALIDAD ONDA - PARTICULA DE LA LUZ. CONCEPTO DE FOTON.

Resumiendo lo que hemos vista hasta ahora tenemos que la luz participa tanto en fenómenos ondulatorios, estudiados en la unidad IV, como en fenómenos corpusculares, que acabamos de ver:



El hecho de que un mismo rayo de luz pueda ocasionar fenómenos ondulatorios o corpusculares nos plantea de nuevo la pregunta, ¿ qué es la luz ? .

Aquí llegamos al concepto de dualidad onda - partícula de la luz. Podemos decir que la luz no es sólo una onda electromagnética ni es sólo un haz de fotones. La luz tiene características tanto ondulatorias como corpusculares y a esto es lo que llamamos dualidad onda - partícula de la luz.

Esta dualidad se refleja en las relaciones: