

## ÍNDICE

Teorías históricas acerca de la luz.....	2
Naturaleza dual de la luz	
Efecto Fotoeléctrico.....	4
Efecto Compton.....	5
Formación de pares.....	6
Principio de indeterminación de Heisenber.....	7
Bibliografía.....	8

## TEORÍAS HISTÓRICAS ACERCA DE LA LUZ

La naturaleza de la luz es un problema que ha ocupado la atención de los hombres desde tiempos remotos. La evolución de nuestros conocimientos sobre la luz ha ido aparejada a la evolución de la Física.

Ya durante la Grecia clásica se empezaron a formular teorías sobre la naturaleza de la luz. Demócrito y su escuela de atomistas consideraban la luz como un flujo de partículas que partían de los focos de luz. Aristóteles rechazó la idea, considerando la luz como algún tipo de interacción entre el ojo y el objeto visto. Para Euclides la luz era un tentáculo lanzado por el ojo hacia el objeto. Sin embargo estas ideas no pueden considerarse propiamente científicas, puesto que no se apoyaban más que en el ingenio y la intuición del autor.

Aproximadamente en el año 1000 un árabe, Al-Hazen, estableció que la luz se dirige desde la fuente externa que la emite hasta los ojos tras ser reflejada por los objetos visibles. Descubrió la ley de la reflexión, explicó rudimentariamente el mecanismo de visión e inició los estudios sobre la refracción.

No fue hasta 600 años más tarde cuando se iniciaron de una manera sistemática los estudios sobre la luz. Durante el siglo XVII se descubrieron todas las leyes experimentales de la Óptica geométrica y de lo que ahora llamamos Óptica física. En 1628 Snellius la ley de la refracción. Basándose en ella Kepler explicó el funcionamiento de las lentes ópticas. Römer determinó la velocidad de la luz ( $2,2 \cdot 10^8$  m/s).

A estas alturas se disponía ya de los conocimientos necesarios para formular una teoría sobre la naturaleza de la luz. Y se formularon dos:

En 1678 **Huygens** elaboró **la teoría ondulatoria de la luz** según la cual la luz era una onda longitudinal que utiliza como soporte material una sustancia que denominó éter. El éter lo llenaba todo y debía ser lo suficientemente elástico como para permitir a la luz una elevada velocidad.

La teoría ondulatoria explica fácilmente la reflexión. Para explicar la refracción supuso que la velocidad en el vidrio era menor que en el aire. En aquella época la comprobación de este dato era imposible. También pudo explicar la doble refracción en el espato de Islandia, con la aparición de una onda ordinaria y de otra extraordinaria debido a la existencia en el cristal de dos medios vibratorios.

Por contra su teoría es incapaz de explicar la propagación rectilínea y la polarización al atravesar dos cristales

de espato de Islandia.

Paralelamente **Newton**, elaboró **la teoría corpuscular de la luz** según la cual la luz era un chorro de partículas que se originaba en el foco de luz.

Para la teoría corpuscular la reflexión no es mas que el rebote de las partículas sobre un cuerpo. La refracción se debería a que la componente perpendicular a la superficie de separación de los medios, de la velocidad de la partícula es mayor en el medio que en el aire. Justo al revés que la teoría ondulatoria.

La explicación de la doble refracción es más rebuscada; los corpúsculos tendrían forma de prisma, dos de cuyas caras interaccionarían con el espato y las otras no. La difracción se debería a la atracción ejercida sobre el corpúsculo por el cuerpo.

Para explicar los anillos de Newton sostuvo que al llegar la luz a la separación entre dos medios, se reflejará o transmitirá dependiendo del espesor del medio. Los colores los achaca al distinto tamaño de los corpúsculos.

Fue la teoría de Newton la que se impuso gracias a ser la más completa y al prestigio del autor. Hasta comienzos del siglo XIX fue unánimemente aceptada.

En 1800 Malus, científico francés, dió nombre a la luz polarizada. El descubrimiento tuvo lugar en el curso de unas investigaciones encaminadas a dar una explicación mejor que la de Newton al fenómeno de la doble refracción (birrefringencia). Ni Malus, ni Biot, ni Laplace, ni otros convencidos corpuscularistas dieron a la luz polarizada una explicación convincente.

Thomas Young, científico inglés, resucitó la teoría ondulatoria y consiguió explicar las interferencias producidas por dos focos luminosos, demostrando que luz más luz puede dar oscuridad. Demostró que los anillos de Newton no son mas que el resultado de interferencias en láminas convergentes. Midió la longitud de onda de diversos colores. Sin embargo al no dar una adecuada forma matemática a sus descubrimientos estos tuvieron poco eco.

En 1814 Fresnel, ingeniero francés, partiendo del principio de Huygens, de que "cada elemento de la superficie de una onda puede actuar como fuente de ondas secundarias", confirmó las interferencias de Young y construyó una base conceptual y matemática para la Óptica física.

La teoría de Fresnel explicó la birrefringencia, la luz polarizada, la polarización circular, la elíptica y todas las predicciones que se derivaban de ella se veían confirmadas por la experiencia. Hacia 1850 la teoría ondulatoria era ya universalmente aceptada y un experimento le dio el triunfo definitivo: Foucault midió en su laboratorio la velocidad de la luz y confirmó la predicción de Huygens; la velocidad de la luz en el agua es  $\frac{3}{4}$  de su velocidad en el aire.

La teoría ondulatoria tenía aún un problema; era una teoría mecanicista, precisaba de un medio en el que se propagara la onda, el éter. esta sustancia debía poseer una elasticidad infinita para que la luz se pudiera propagar con la velocidad que lo hacía.

En 1887 Hertz descubrió la existencia de un campo electromagnético, como había predicho Maxwell. En ese mismo año Michelson y Morley descubrieron que la Tierra no se desplazaba respecto al éter; por lo que no debería existir. En 1893 Hertz midió la velocidad de propagación de un campo electromagnético y resultó ser la misma que la de la luz.

En este momento la luz se deshizo del lastre mecanicista que arrastraba desde el principio de la ciencia. Era un fenómeno que nada tenía que ver con las leyes de Newton. En este punto de la historia la Física entendía tres realidades: la materia, a la que se le aplicaban las leyes de la mecánica de Newton; las radiaciones, con las

leyes del electromagnetismo de Maxwell y la energía, con las leyes de la termodinámica.

Se creía así mismo que la Física estaba acabada, que los pocos fenómenos que aún no tenían explicación se les encontraría alguna en poco tiempo.

Las explicaciones que se dan a tres de estos fenómenos van a revolucionar la Física. Uno de estos fenómenos los descubrió Hertz se trata del efecto fotoeléctrico, otro se conoce como efecto Compton en recuerdo a su descubridor y el último es la formación de pares.

La importancia de estos efectos tanto por si mismos, como por su influencia en la concepción de la luz, justifica que nos detengamos en su estudio por separado.

## **NATURALEZA DUAL DE LA LUZ**

### **Efecto fotoeléctrico**

El efecto fotoeléctrico consiste en la pérdida de electrones por parte de un metal al ser iluminado con radiación electromagnética.

Para experimentar se disponen dos electrodos en el interior de una ampolla transparente en la que se ha realizado el vacío. El cátodo es del metal a estudiar mientras que el ánodo es de cualquier otro metal. El circuito eléctrico se cierra con una fuente de potencial y un galvanómetro.

En la experimentación variando las características de la radiación incidente sobre el cátodo se observa que:

–Existe una frecuencia umbral por debajo de la cual no se produce emisión de electrones, con independencia de la intensidad de la radiación.

–Por encima de la frecuencia umbral por poca que sea la intensidad de la radiación, se verifica instantaneamente el efecto fotoeléctrico.

–Para una radiación de frecuencia superior al umbral, la intensidad de corriente aumenta hasta un máximo ( $I_s$ ) al aumentar el potencial aplicado a los electrodos.

–Para una misma frecuencia  $I_s$  es proporcional a la intensidad de la radiación.

–Al invertir el potencial y aumentarlo progresivamente, llega un momento en el que la intensidad de corriente se anula. En ese instante el trabajo realizado por el potencial de frenado ( $V_f$ ) es igual a la energía cinética máxima de los fotoelectrones:

$e V_f = \frac{1}{2} m_e v_{2e}^2$  Una vez detenida la corriente eléctrica, se observa que un aumento de la intensidad de la radiación incidente no la restablece.

La explicación de efecto fotoeléctrico no es posible sobre la base de la teoría ondulatoria. Según esta, los electrones del metal podrían acumular energía de la onda incidente hasta que tuvieran la suficiente para escapar. Pero que esto no ocurría lo evidencia que el efecto fuera instantaneo.

La primera explicación satisfactoria la dio Einstein en 1905. Lo hizo partiendo de una proposición revolucionaria:

La teoría ondulatoria es válida para los fenómenos que se desarrollan a lo largo del tiempo (p.e: interferencias, difracción, etc.), pero no lo es para explicar los fenómenos de interacción de la radiación con la materia.

Según la hipótesis de Einstein la energía no se distribuía uniformemente sobre el frente de onda, si no que estaba agrupada en cuantos, en paquetes de energía que él denominó fotones. Cada fotón tendría una energía de:

$E = h\nu$  siendo  $h$  la cte de Planck.

Retomaba un concepto definido por Planck para explicar la radiación del cuerpo negro. Einstein reclamó la existencia real de los cuantos. Gracias a los cuales la explicación del efecto fotoeléctrico es sencilla.

En el momento que un fotón con la energía suficiente incidía en el metal, había un electrón que tomaba esa energía y se escapaba. El proceso es instantáneo. Si el fotón tiene menos energía el electrón no escapa, no es posible que un electrón acumule la energía de varios fotones. Si el fotón tiene más energía, el exceso lo conservará el electrón como energía cinética.

Con este modelo es fácil comprender que no importa la intensidad de la radiación (número de fotones) sino su frecuencia (energía de cada fotón).

La energía mínima que necesita un electrón para escapar es  $eF$ . Toda la energía que de más del fotón se transformará en energía cinética del electrón:  $\frac{1}{2} m_e v_e^2 = h\nu - eF$

Demostrar que la cantidad de movimiento de un fotón vale  $h/\lambda$ .

$p = m \cdot v = m \cdot c = m \cdot c^2/c$  según Einstein:  $E = mc^2$

$p = E/c = h\nu/c = h/\lambda$

Determinar la relación que existe entre el potencial de frenado  $V_f$  y la frecuencia en una relación lineal.

El trabajo de frenado es igual a la energía cinética de frenado:

$V_f \cdot e = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = h\nu - eF$

despejando  $V_f$ :  $V_f = (h/e) \cdot \nu - F$

que es una relación lineal de pendiente  $h/e$ .

Al iluminar un metal con luz de frecuencia 1015 Hz, emite fotoelectrones que pueden detenerse con un potencial de frenado de 0,6 V. Si se utiliza luz de  $2,5 \cdot 10^{-7}$  m de longitud de onda, dicho potencial pasa a ser de 0,23 V. Calcular  $F$  sabiendo que  $h \cdot e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

Para la primera situación se cumple:

$0,6 = h \cdot 1015 / 1,6 \cdot 10^{-19} - F$  y para la segunda:

$0,23 = h \cdot 3 \cdot 10^8 / 2,5 \cdot 10^{-7} - 1,6 \cdot 10^{-19} - F$

resolviendo el sistema de ecuaciones formado:

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s  $F = 0,74$  V

En 1913 Bohr estableció un modelo atómico según el cual los átomos sólo absorben o emiten energía en ciertas cantidades, múltiplos enteros de  $h \cdot \nu$ . Este modelo explicaba los espectros conocidos y aumentó la

confianza en la realidad de los cuantos luminos.

## Efecto Compton

En 1924 Compton ideó y realizó un experimento que confirmó la teoría corpuscular de Einstein.

Compton pensó que si la luz era un chorro de partículas, un fotón al chocar con otra p.e. un electrón se comportarían como dos bolas de billar. En el choque se debería conservar la cantidad de movimiento.

Compton lo comprobó haciendo incidir rayos X sobre parafina, y el resultado confirmó el resultado.

Si estudiamos el fenómeno como el choque de dos bolas de billar. Antes y después del choque se debe conservar la energía de las dos partículas:

$$h \cdot \nu_i + \frac{1}{2} m_e \cdot v_o = h \cdot \nu_d + \frac{1}{2} m_e \cdot v$$

También se conservará la cantidad de movimiento. Teniendo en cuenta que es una magnitud vectorial y que el movimiento se verifica en el plano XY:

$$\text{Eje X: } h \cdot \nu_i / c = h \cdot \nu_d / c \cos(\alpha) + m \cdot v \cos(\delta) \quad \text{Eje Y: } 0 = h \cdot \nu_d / c \sin(\alpha) - m \cdot v \sin(\delta)$$

Con estas tres ecuaciones podemos calcular la variación de longitud de onda entre el rayo incidente y el difundido:

$$\Delta \lambda = \lambda_d - \lambda_i = h \cdot (1 - \cos(\alpha)) / m \cdot c$$

Esta expresión describe exactamente la realidad experimental. Esto confirmó las teorías de Einstein.

Cuando  $\alpha = 90^\circ$   $\Delta \lambda = 2.43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$  y se conoce como longitud de onda de Compton.

Rayos X de  $0.72 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  de longitud de onda son difundidos por un sólido bajo un ángulo de  $60^\circ$  con la dirección del rayo incidente.

Calcular la variación de la longitud de onda debida al efecto Compton. Datos:  $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$\Delta \lambda = h \cdot (1 - \cos(\alpha)) / m \cdot c = 6.625 \cdot 10^{-34} \cdot (1 - 0.5) / 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8 = 1.21 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

## Formación de pares

Si el fotón en lugar de chocar con un electrón lo que hace es pasar cerca del núcleo de un átomo, interactuará con él descomponiéndose en un electrón y un positrón. El positrón es la antipartícula del electrón; tiene la misma masa, espín y carga salvo que de signo opuesto. A este proceso se le llama de formación de pares y también ocurre a la inversa, un electrón y un positrón se unen para dar un fotón.

Durante el proceso se conserva la energía y el momento lineal. Esto quiere decir que:

$$h \cdot \nu = 2 \cdot m_e \cdot c^2 + \frac{1}{2} m_e \cdot (v_e^2 + v_{e^+}^2)$$

Un fotón de  $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  al pasar cerca del núcleo de un átomo se descompone en dos partículas ( $e^-$  y  $e^+$ ). Calcular la energía cinética de cada una de las partículas.

$$h.u = 2.me.c^2 + 2.E_c \quad E_c = (h.u - 2.me.c^2)/2 =$$

$$= (6,6210 - 34.51014 - 2.0,9110 - 30.2,99108)/2 = -8,1310 - 14 \text{ J}$$

Estas dos explicaciones volvieron a arrojar sombras sobre teoría ondulatoria. La idea de Einstein de que para unos fenómenos la luz es una onda mientras que para otros es un corpúsculo no convenció ni al mismo autor; para el que la luz se comportaba "como si" estuviera formada por corpúsculos.

Por otro lado los fenómenos de interferencia no podían ser explicados mas que con la teoría ondulatoria.

En 1924 Louis de Broglie presentó su tesis doctoral, en la que establecía que si la luz tenía naturaleza corpuscular los corpúsculos deberían tener naturaleza ondulatoria. Así un electrón tendría una onda asociada de longitud de onda:

$$\lambda = h/m.v$$

El se fijó en electrón cuando orbita alrededor de un núcleo. El electrón debe en su movimiento alrededor del núcleo tener asociada una onda, para que la órbita sea estable la onda debe ser estacionaria. Para que sea así la longitud de la órbita ( $2.p.r_n$ ) debe ser igual a un número entero de longitudes de onda ( $n.\lambda$ ):

$$2.p.r_n = n.\lambda$$

Para que el electrón permanezca en órbita la fuerza centrífuga ( $m.v^2$ ), debe ser igual a la que ejerce el núcleo ( $e^2/4.p.eo.r_n^2$ ). Despejando  $v$ , y sustituyéndola en la expresión que dio Louis de Broglie para la longitud de onda:

$$\lambda = h.(4.p.eo.m.r_n)^{1/2}/m.e$$

sustituyéndola en la hipótesis de estacionariedad de la onda y despejando el radio de la órbita:

$$r_n = n^2.h^2.eo/p.m.e^2$$

La energía total de un electrón tendrá un término correspondiente a la energía cinética y otro a la potencial:

$$E = m.v^2/2 - e^2/4.p.eo.r$$

incluyendo la expresión que para  $v$  despejamos más arriba:

$$E = -e^2/8.p.eo.r_n = m.e^4/8.eo^2.h^2.n^2$$

Con esta expresión se puede conocer la energía absorbida o emitida al pasar el electrón de una órbita a otra. Y los resultados teóricos coinciden plenamente con los experimentales. Se puede decir por tanto que toda partícula tiene asociada una onda. Se cerraba de este modo el ciclo onda-corpúsculo, corpúsculo-onda.

Calcular la longitud de onda asociada a un electrón de 50 eV y la longitud de onda asociada a una esfera de 1 kg de masa que se mueve 10 m/s.

Para el electrón:

$$\lambda = h/(2.m.E_c)^{1/2} = 6,63 \cdot 10^{-34} / (2.9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{1/2} = 0,174 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Para la esfera:

$$\lambda = h/m \cdot v = 6,63 \cdot 10^{-34} / 1 \cdot 10 = 6,63 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Una longitud de onda tan pequeña que es imposible de detectar.

Todos estos descubrimientos dejaron en evidencia a la Física clásica que era incapaz de explicar los fenómenos que implicaran una cuantización apreciable. Para poder explicarlos era necesaria la mecánica cuántica. Su nacimiento fue difícil, había que cambiar no sólo la física sino también la mente de los científicos. Hasta ahora acostumbrados a abstraer ideas de la realidad tangible, debían hacerlo ahora del intangible mundo microscópico.

El pensamiento determinista consideraba que conociendo perfectamente las leyes que gobernaban un mecanismo (una órbita planetaria, una vida animal, etc.) y ciertas magnitudes características en un momento dado era posible conocer como evolucionaría en el futuro.

### **El principio de indeterminación de Heisenber.**

En 1927 el físico alemán Heisenberg enunció el se llamó principio de indeterminación de Heisenberg. Que decía que había ciertos pares de magnitudes (posición y cantidad de movimiento, energía y tiempo) cuyos valores no pueden conocerse con una precisión arbitrariamente grande simultaneamente.

Podremos conocer una de ellas con tanta precisión como queramos pero eso irá en detrimento de la precisión con que se mida la otra. Heisenberg lo cuantifica: el producto de las incertidumbres de ambas magnitudes es mayor o igual a  $h/2\pi$ .

Al trabajar en el mundo macroscópico las consecuencias del principio son irrelevante. Supongamos una partícula de masa perfectamente conocida de 1 mg, en ese caso:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq h/2\pi \cdot m = 6,63 \cdot 10^{-34} / 2\pi \cdot 10^{-6} = 10^{-28} \text{ m}^2/\text{s}$$

Esto supone que si conocemos la velocidad con una precisión de  $10^{-14}$  m/s la precisión de la posición será de  $10^{-14}$  m. Siendo ambos excelentes valores.

Si hacemos el mismo cálculo para un electrón:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq h/2\pi \cdot m = 6,63 \cdot 10^{-34} / 2\pi \cdot 9 \cdot 10^{-31} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Esto supone que si conocemos la posición del electrón entorno al núcleo necesitaremos una precisión de  $10^{-10}$  m; conoceremos la velocidad con una precisión de 106 m/s (absolutamente inadmisibles).

Por esta razón no fue hasta que se empezó a investigar el mundo microscópico cuando se "apareció" el principio de incertidumbre.

El principio de incertidumbre acabó con el determinismo en el mundo microscópico. Pero las leyes que rigen en el mundo macroscópico se pueden obtener de las del mundo microscópico, esto significa que la descripción del mundo macroscópico puede no ser determinista.

Pero no todos los científicos estaban dispuestos a aceptarlo, uno de ellos era Einstein, que se negó a reconocer el indeterminismo hasta su muerte. Es elocuente su famosa frase: "Dios no juega a los dados".

### **Bibliografía:**

—"Física"; J. Casanova, J.L. Casanova, M.L. Sanchez; Ed. Santillana.

–"Física universitaria"; F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young; Ed. Fondo

Educativo Interamericano.

8