

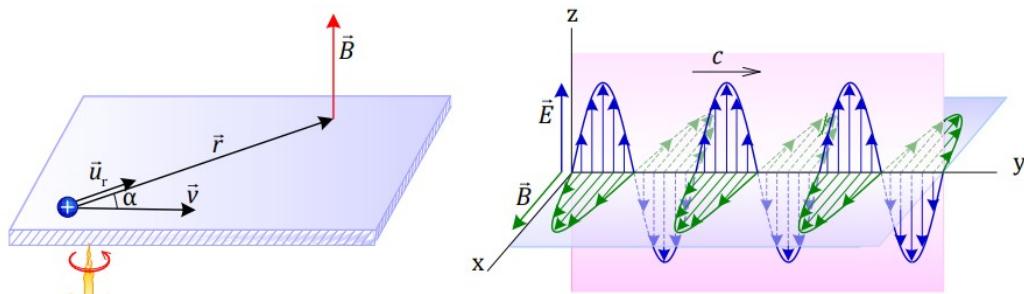
TEMA 8: LA LUZ Y LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1.- ESTUDIO CUALITATIVO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Toda carga eléctrica crea un campo eléctrico: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot \vec{u}_r}{r^2}$.

Si la carga está en movimiento, además del campo eléctrico, crea un campo magnético: $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Q \cdot (\vec{v} \times \vec{u}_r)}{r^2}$, siendo las direcciones perpendiculares.

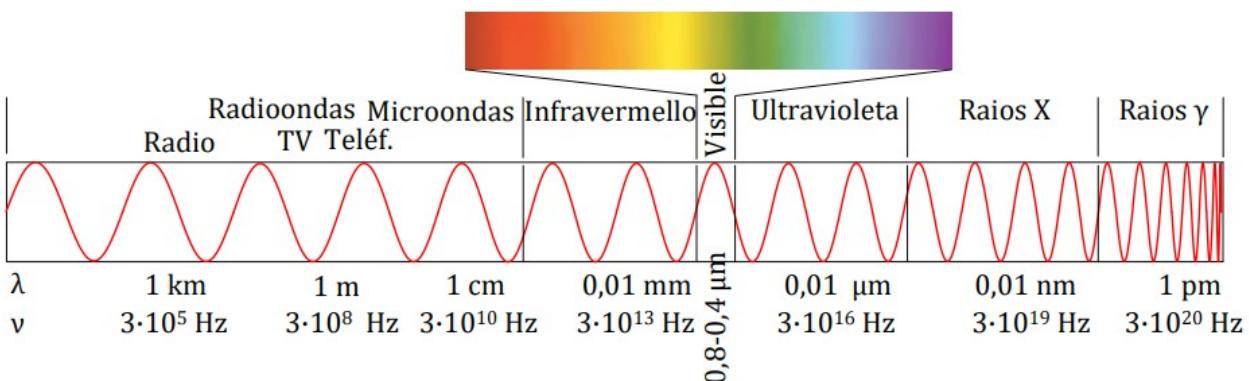
Puede comprobarse que si la velocidad de la carga no varía, su energía permanece constante, pero si la velocidad de la carga no es constante, esta emite energía en todas direcciones en forma de ondas electromagnéticas.



La propagación de los campos eléctrico y magnético variables, que vibran en planos perpendiculares entre si y en fase, creados por una carga eléctrica acelerada, recibe el nombre de onda electromagnética. Estas ondas se propagan con la velocidad de la luz en una dirección perpendicular a la dirección de perturbación, por lo que se trata de una onda transversal (su dirección y sentido de propagación es la del vector $\vec{E} \times \vec{B}$, llamado vector de Poynting)

2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La luz es una onda electromagnética, pero no todas las ondas electromagnéticas son percibidas por el ojo humano. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las ondas electromagnéticas que es posible producir o detectar. Estas abarcan una gama muy amplia de frecuencias (10 Hz - 1023 Hz) constituyendo el llamado espectro electromagnético



Los diversos intervalos de frecuencias tienen nombres específicos, que son:

Radioondas ($3 \cdot 10^2$ Hz - $3 \cdot 10^9$ Hz): Son las ondas electromagnéticas de menor frecuencia.

Se producen en un circuito oscilante LC. Se emplean en radiodifusión y

telecomunicaciones. **Microondas** ($3 \cdot 10^9$ - $3 \cdot 10^{12}$ Hz): Son producidas por vibraciones de moléculas. Se utilizan en radioastronomía y comunicaciones.

Rayos infrarrojos ($3 \cdot 10^{12}$ Hz - $3 \cdot 10^{14}$ Hz): Son producidas por vibraciones atómicas. Se emplean en la industria y en medicina.

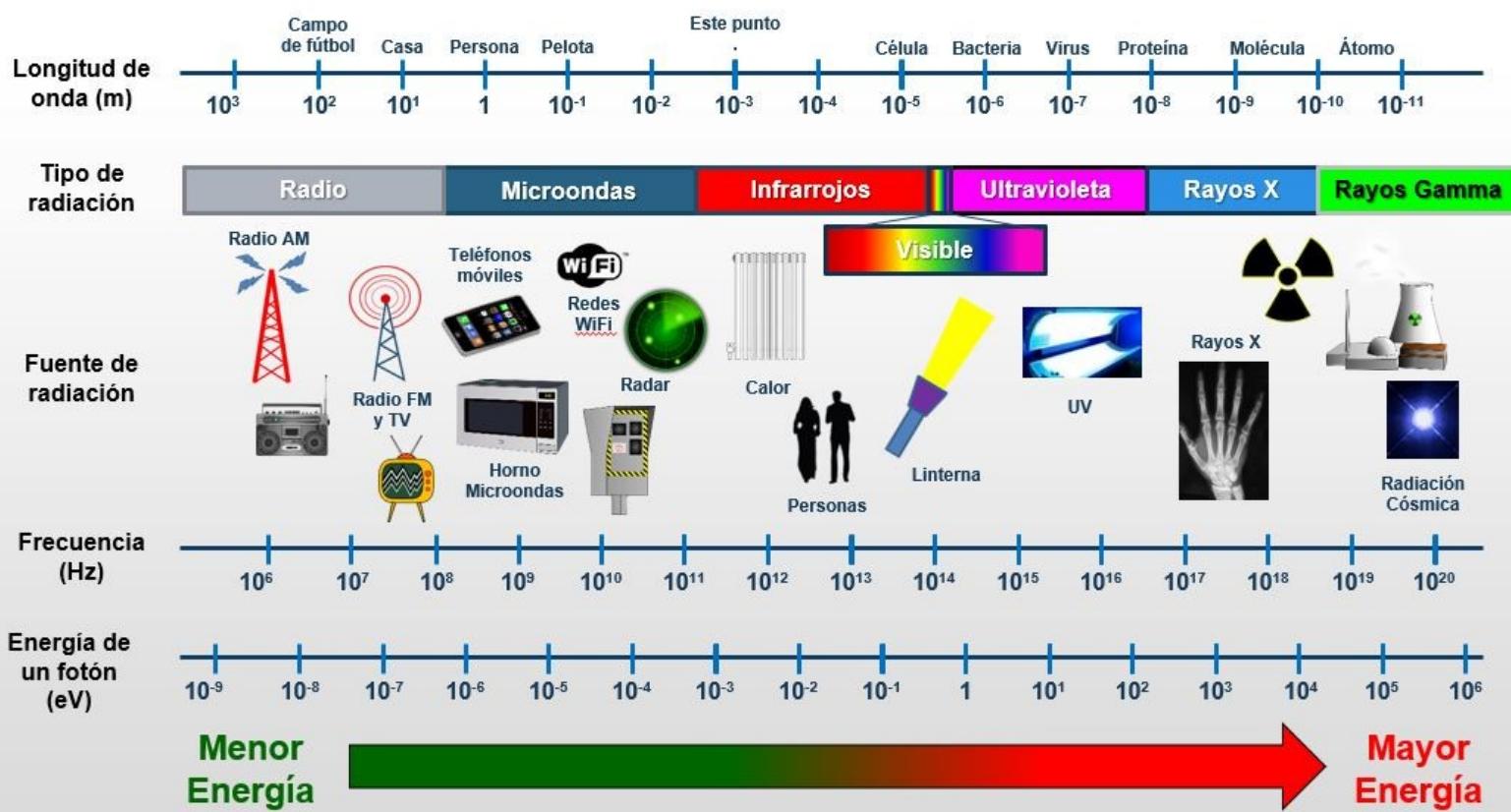
Luz visible ($3,8 \cdot 10^{14}$ Hz –rojo– hasta $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz –violeta): Son producidas por oscilaciones de los electrones más externos del átomo. Se emplean para la visión, láser etc. La radiación solar está formada por un 60 % de rayos visibles, el 37 % de radiación infrarroja y el 3 % de radiación ultravioleta.

Rayos ultravioletas ($8 \cdot 10^{14}$ Hz - 10^{17} Hz): Son producidas por oscilaciones de los electrones internos del átomo. Se emplean en medicina. El Sol es un gran emisor de rayos ultravioletas. Ayudan al organismo para sintetizar la vitamina D (una de las pocas que el ser humano es capaz de sintetizar). La fuente natural de esta radiación es el Sol. Podemos producir la mediante lámparas de vapor de mercurio. Son peligrosos para los tejidos debido a su poder energético.

Rayos X (10^{16} Hz - 10^{21} Hz): Son producidos en las oscilaciones de electrones próximos al núcleo. Se utilizan en la industria y en medicina.

Rayos gamma (10^{19} Hz y mayores): Son de origen nuclear, apareciendo en las reacciones nucleares. Son dañinos para los seres vivos.

El espectro electromagnético (EEM)



3. EVOLUCIÓN DE LAS TEORÍAS ACERCA DE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Huygens, a finales del siglo XVII (1690) y Newton, a comienzos del siglo XVIII (1704), enuncian dos teorías acerca de la naturaleza de la luz: la ondulatoria y la corpuscular.

La teoría ondulatoria de Huygens dice que la luz se propaga mediante ondas mecánicas, semejantes a las ondas sonoras, emitidas por los cuerpos luminosos. Como la luz se propaga en ausencia de aire, por ejemplo en el interior de una campana en la que está hecho el vacío, Huygens supone la existencia de un medio elástico ideal, al que se le dio el nombre de éter, que estaba presente en todos los medios materiales y también en el vacío. Huygens pensaba que las ondas luminosas eran longitudinales (por analogía con el sonido), mientras que Hooke defendía que eran transversales. Con esta teoría se interpretaba muy fácilmente a los fenómenos de propagación rectilínea, reflexión, refracción y doble refracción. Sin embargo, los partidarios de la idea de luz como corpúsculo objetaban que si la luz era un movimiento ondulatorio, las ondas luminosas deberían bordear los obstáculos (difracción) en su trayectoria y, en consecuencia, no habría sombras y se podrían ver los objetos detrás de una esquina. La teoría corpuscular de Newton dice que la luz está formada por diminutas partículas materiales – corpúsculos–, emitidas a gran velocidad y en línea recta por los cuerpos luminosos. La dirección de propagación de estas partículas recibe el nombre de rayo luminoso. De esta forma Newton también explica los fenómenos de propagación rectilínea, reflexión y refracción de la luz y justifica las sombras.

La gran personalidad científica de Newton hace que su teoría prevalezca sobre la de Huygens.

En el año 1801, la experiencia de Young sobre la interferencia de la luz pone en duda la teoría corpuscular, tomando importancia la teoría ondulatoria.

Fresnell (1816) dio una explicación satisfactoria del fenómeno de la difracción con la teoría de Huygens.

A pesar de estos descubrimientos, la teoría corpuscular aún seguía teniendo algunos partidarios. Era necesario medir la velocidad de la luz en el agua y en el aire, ya que en este punto las dos teorías eran contradictorias. Para Newton la velocidad era mayor en el agua (medio más denso) mientras que para Huygens es mayor en el aire. En 1850 Foucault demostró experimentalmente que la luz tiene mayor velocidad en el aire que en el agua. Es Maxwell (1873) quien da un nuevo impulso a la teoría ondulatoria al demostrar, con unas ecuaciones matemáticas que establece, que un circuito oscilante LC debe emitir ondas electromagnéticas con la velocidad:

$$v_{\text{baileiro}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 300000 \text{ km/s}$$

(que coincide con la velocidad de la luz en el vacío, c). Esto le hace suponer que la luz es una pequeña parte del espectro electromagnético, abandonando la idea de onda mecánica para la luz.

En 1885 Hertz confirma experimentalmente que las ondas luminosas y las ondas electromagnéticas producidas por una corriente eléctrica oscilante (salvo la visibilidad) son de igual naturaleza.

Ahora es la teoría ondulatoria la que prevalece. Pero dos años más tarde, en 1887, Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por parte de algunos metales al ser iluminados con luz, que debe tener un valor mínimo de frecuencia, independientemente de la intensidad de la radiación. Además la energía cinética máxima de los electrones arrancados solo depende de la frecuencia de la luz excitadora, siendo independiente de la intensidad que posea. Estos hechos no pueden ser explicados con la teoría ondulatoria ya que, según esta, la energía de una onda es directamente proporcional a su intensidad y si esta es suficientemente grande, aún que la frecuencia sea pequeña, deberían arrancarse los electrones con una velocidad proporcional a la intensidad de la radiación.



James Clark Maxwell (1831-1879)



Heinrich Hertz (1857-1894)

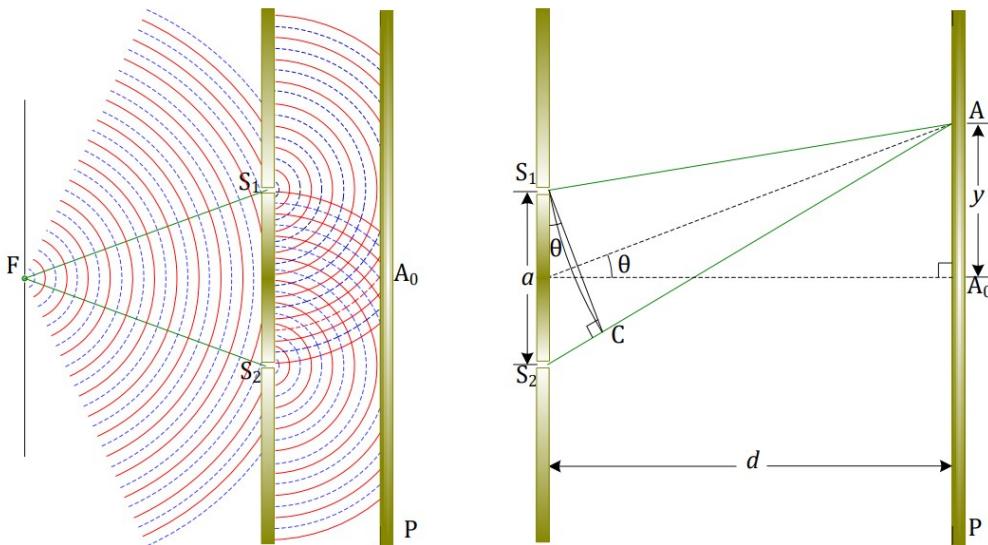
Resumiendo:

- Algunos fenómenos luminosos pueden ser explicados indistintamente por la teoría ondulatoria o corpuscular. Son los fenómenos de propagación rectilínea y reflexión.
- Otros fenómenos son típicamente ondulatorios, como las interferencias, la difracción y la polarización.
- Y, por último, los efectos fotoeléctrico y Compton, entre otros, solo pueden ser interpretados con una teoría corpuscular.

El resultado es que la luz puede presentar la naturaleza ondulatoria (teniendo una frecuencia y una longitud de onda) y la corpuscular (con una cantidad de movimiento), manifestando una u otra naturaleza según las condiciones del fenómeno que se observe. Sin embargo, en ningún fenómeno presenta el carácter dual de una forma simultánea.

4. A EXPERIENCIA DE YOUNG DE LA DOBLE RENDIJA

EL dispositivo experimental de la experiencia consiste en un foco luminoso F, que emite una intensa luz monocromática, que ilumina una pantalla P, intercalando en el camino una barrera en la que hay dos pequeñas aberturas S₁ y S₂ separadas entre si una distancia *a* muy pequeña y equidistantes del foco F. Cuando la onda luminosa, que parte de F, alcanza las aberturas S₁ y S₂, según el principio de Huygens, se convierten en nuevos focos emisores de ondas coherentes (con igual fase inicial, amplitud, longitud de onda y frecuencia).



En la figura se representa, en un instante dado, las crestas por líneas continuas rojas y los valles por líneas azules a puntos. En los puntos donde se cortan crestas con crestas y valles con valles aparecen interferencias constructivas, mientras que cuando coinciden las crestas de un foco con los valles del otro hay interferencia destructiva. Las interferencias constructivas determinan en la pantalla P zonas luminosas y las destructivas zonas oscuras y se conocen como franjas de interferencia. En un punto A de la pantalla habrá máxima luz o oscuridad completa según se verifiquen, respectivamente, las condiciones siguientes:
 $S_2A - S_1A = n \lambda$
 $S_2A - S_1A = (2n + 1) \lambda/2$, siendo n un número entero.

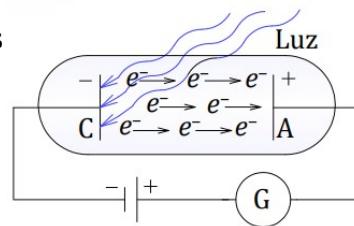
La posición (distancia *y*) de las franjas brillantes y oscuras con respecto al punto central puede calcularse suponiendo que la distancia *d* desde las aberturas a la pantalla es mucho mayor que la separación *a* de las aberturas: $d \gg a$.

Con luz que no sea monocromática, y especialmente con luz blanca, solo pueden observarse algunas franjas próximas a la franja central, pues, a medida que nos alejamos de esta, las bandas van siendo irisadas (presentando los colores del arco iris), ya que las radiaciones con distinta longitud de onda tienen sus máximos para valores distintos de λ , debido a que en los medios materiales la velocidad de la luz depende de la longitud de onda. Como en la propagación de la luz en un medio material la frecuencia permanece constante, la variación de velocidad que experimenta se debe a su distinta longitud de onda. En el vacío es: $c = \lambda \cdot v$ = cte y en un medio material tenemos: $v = \lambda \cdot v = f(\lambda)$.

Esta experiencia de Young pone en evidencia la naturaleza ondulatoria de la luz.

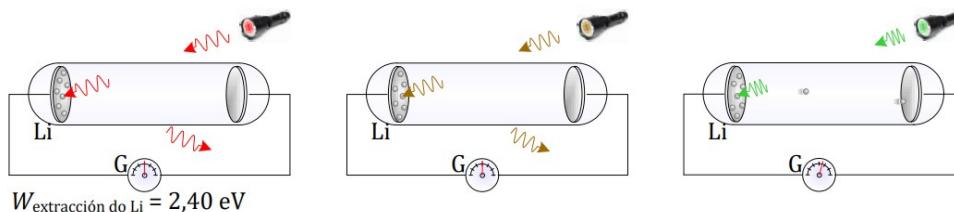
5. EFECTO FOTOELÉCTRICO. INTERPRETACIÓN

Con el nombre de **efecto fotoeléctrico** se conoce la propiedad que tienen algunos metales de emitir electrones cuando se encuentran sometidos a la acción de la luz (visible o ultravioleta). Los electrones así emitidos se llaman fotoelectrones. Este fenómeno fue descubierto por Hertz en 1887. La figura representa una ampolla transparente en la que se practicó el vacío y en la que hay dos electrodos: el cátodo, de Zn por ejemplo, conectado al borne negativo de una batería y el ánodo, conectado al borne positivo. Este dispositivo constituye una célula fotoeléctrica. Cuando una radiación luminosa incide sobre el cátodo y este emite electrones, que son atraídos por el ánodo, el galvanómetro marca paso de corriente.



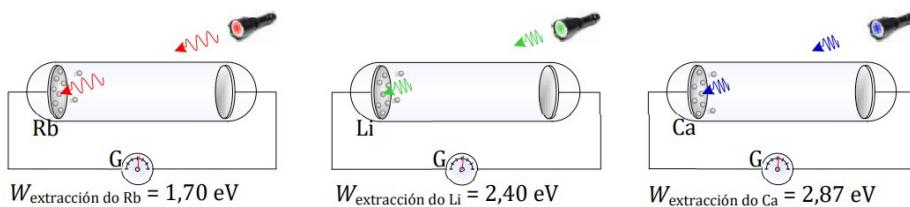
Se observa que:

Si iluminamos el cátodo de una célula fotoeléctrica con luz monocromática de distinta longitud de onda, λ , el galvanómetro empieza a indicar paso de corriente cuando la frecuencia f de la radiación alcanza un determinado valor, f_0 , que se conoce como frecuencia umbral. Es necesaria una frecuencia mínima de la radiación para poder arrancar electrones



del metal.

- La frecuencia umbral es característica de cada metal.

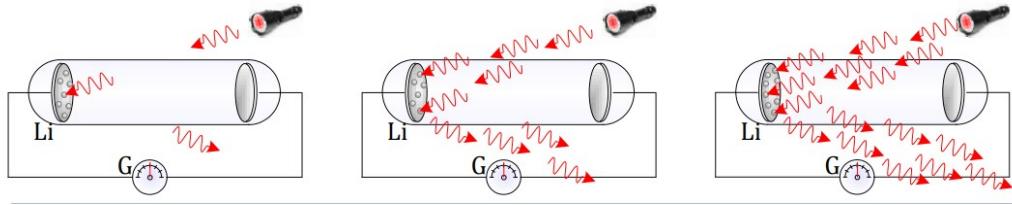


La frecuencia umbral del calcio es mayor que la del litio, y la de este metal es mayor que la del rubidio.

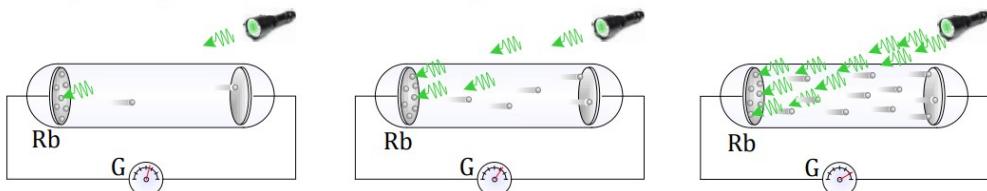
- La frecuencia umbral es independiente de la intensidad de la radiación. Esto no concuerda con la teoría clásica que predice que el efecto fotoeléctrico debe ocurrir

para cualquier frecuencia con tal de que la intensidad luminosa sea lo suficientemente alta.

Por muy intensa que sea la radiación, para una frecuencia inferior a la umbral, no se arrancan electrones.

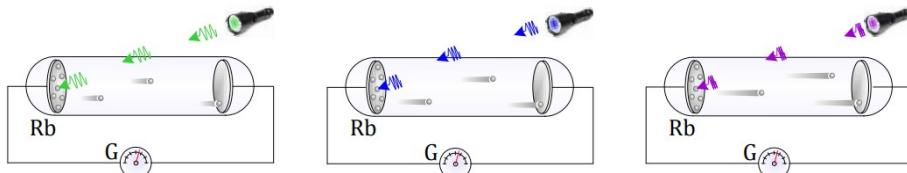


Si la frecuencia de la luz incidente es igual o mayor a la frecuencia umbral, el número de fotoelectrones emitidos, que se mide por la corriente que circula por el galvanómetro, es directamente proporcional a la intensidad luminosa. Así, si duplicamos la intensidad de la radiación que incide sobre el cátodo, también se duplica el número de fotoelectrones. Pero la energía cinética máxima de los fotoelectrones es independiente de la intensidad de la luz (hecho que no se puede explicar con la teoría clásica de la luz)

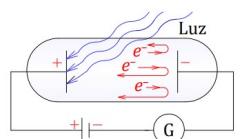
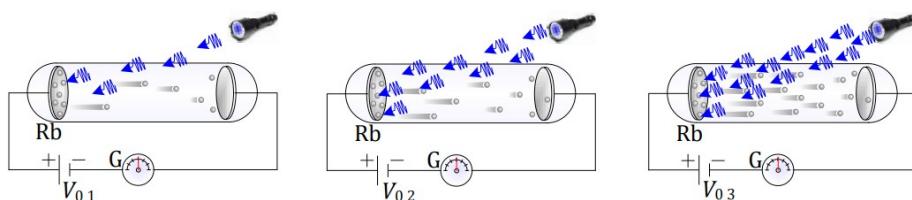


El número de fotoelectrones emitidos es directamente proporcional a la intensidad de la radiación, no variando la energía cinética con que son arrancados.

- La energía cinética máxima de los fotoelectrones aumenta al aumentar la frecuencia de la radiación. Al aumentar la frecuencia de la radiación también aumenta la energía cinética de los fotoelectrones.

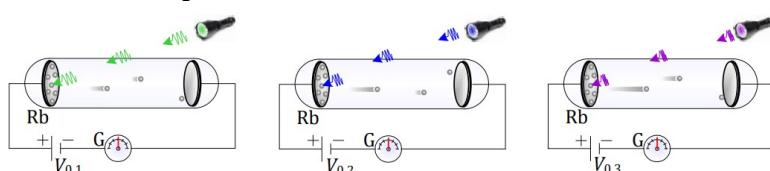


- Si invertimos la polaridad de los electrodos, este voltaje crea un campo que atrae a los fotoelectrones, anulándose la corriente para un valor V_0 , llamado **potencial de detención, de frenado o de corte**. Su valor no depende de la intensidad de la radiación monocromática.



$$V_{01} = V_{02} = V_{03}: \text{El potencial de detención no depende de la intensidad de la radiación}$$

- El potencial de detención **si depende de la frecuencia de la radiación**: al aumentar la frecuencia aumenta el potencial de detención, siendo esta relación lineal.



$$\text{Al aumentar la frecuencia de la radiación también aumenta el potencial de detención: } V_{01} < V_{02} < V_{03}$$

Una explicación satisfactoria de estos hechos la dio Einstein, en el año 1905, aplicando a la luz las ideas de Planck sobre la radiación térmica: la luz se propaga por el espacio, transportando energía en cuantos (“paquetes” discretos) de luz, llamados fotones, con un valor de energía que viene dado por la expresión: $E = h \cdot f$, siendo f la frecuencia y h la constante de Planck. De acuerdo con este modelo, un aumento de intensidad luminosa significa un mayor número de “paquetes” de energía, pero la energía de cada paquete solo depende de la frecuencia de la luz.

La energía transportada por un fotón incidente se distribuye de la siguiente forma:

- ✓ En la energía necesaria para liberar un electrón de los átomos del metal, que es constante para cada metal, y recibe el nombre de **trabajo de extracción**: W_0 .
- ✓ En la energía cinética con que sale el electrón del metal, E_c .

Como consecuencia resulta la siguiente ecuación:

$$h \cdot f = W_0 + \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico.}$$

Con esta teoría, la interpretación del efecto fotoeléctrico es la siguiente:

✓ El hecho de que el efecto fotoeléctrico no se produzca para frecuencias inferiores a la frecuencia umbral se debe a que si la energía del fotón incidente, $h \cdot f$, es inferior al trabajo de extracción, W_0 , no se llega a arrancar el electrón y, en consecuencia, no se produce el efecto fotoeléctrico por muy intensa que sea la radiación utilizada, ya que la intensidad influye en el número de fotones, pero no en la energía de cada fotón, que solamente depende de su frecuencia.

✓ El hecho de que el número de fotoelectrones sea directamente proporcional a la intensidad de la radiación se debe a que al aumentar la intensidad (el número de fotones), con frecuencia igual o superior a la frecuencia umbral, también aumenta el número de fotoelectrones, no variando su energía cinética (E_c máx. = $h \cdot v - W_0$) al depender de la frecuencia y no de la intensidad. Sin embargo, si también variamos la frecuencia también varía la E_c máx..

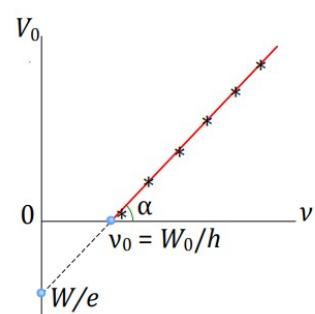
✓ La interpretación de que el potencial de detención aumenta con la frecuencia y es independiente de la intensidad es la siguiente: los electrones son emitidos por el cátodo con una velocidad v , adquiriendo una energía cinética, E_c , de valor: $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$. Al invertir el potencial los electrones están sometidos a una fuerza que los rechaza con una energía $|e \cdot V_0|$ (función trabajo), siendo e la carga del electrón.

Su velocidad se anula cuando: $|e \cdot V_0| = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

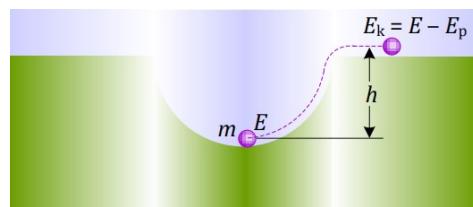
Como además $E_c = h \cdot f - W_0$, podemos escribir: $|e \cdot V_0| = h \cdot f - W_0$

Por lo tanto, el valor de V_0 depende de la frecuencia: de la energía del fotón, pero no de la intensidad: del número de fotones.

Utilizando radiaciones de distinta frecuencia f , se puede obtener una serie de valores para el potencial de detención V_0 , y la gráfica que se obtiene al representar V_0 frente a f es una línea recta, cuya pendiente es: $\tan \alpha = h/e$. Midiendo α y utilizando el valor de e se calcula la constante de Planck h , coincidiendo el valor así calculado con el que se obtiene por otros métodos. Esta concordancia es una confirmación más de la existencia de los fotones.



Como analogía mecánica del efecto fotoeléctrico podemos considerar una bola de masa m en reposo en el interior de un pozo de profundidad h . Para que la bola salga del pozo se necesita comunicarle de una sola vez una energía mínima, $E_{\text{mínima}}$, igual a la energía potencial E_p : $E_p = m \cdot g \cdot h$. Si se le da una energía E , que sea superior a la $E_{\text{mínima}}$, la bola “escapará” con una velocidad v , de acuerdo con el siguiente balance energético: $E = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2}mv^2$ donde $m \cdot g \cdot h$ representa el trabajo de extracción y E la energía del fotón incidente.

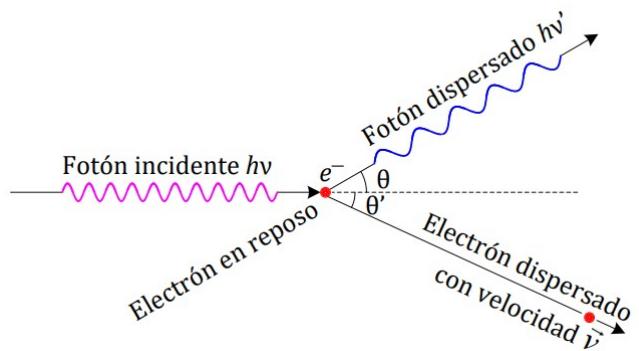


6. EFECTO COMPTON

En año 1923 Compton estudió la dispersión de los rayos X (ondas electromagnéticas) por cuerpos ligeros, como el grafito, la parafina etc. Observó que al bombardear con RX un electrón casi libre, es decir: ligado débilmente con el núcleo de su átomo, e inicialmente en reposo, la radiación es dispersada y tiene una frecuencia menor que la radiación incidente. Esto se explica suponiendo que los fotones chocan con el electrón (dispersándose la radiación) y adquiere una cierta energía cinética, siendo la radiación dispersada de menor energía que la radiación incidente: el fotón dispersado tiene mayor longitud de onda que el fotón incidente. Compton encontró

experimentalmente que la diferencia de longitudes de onda de la radiación dispersada (λ') e incidente (λ) no depende de la longitud de onda de la radiación incidente ni de las propiedades de la sustancia dispersora, sino que solo es función del ángulo θ formado por las direcciones de estas radiaciones, según la ecuación: $\lambda' - \lambda = \lambda_c \cdot (1 - \cos\theta)$, siendo λ_c una constante para todas las sustancias, llamada longitud de onda de Compton para el electrón, y fue determinada experimentalmente con un valor de $2,42 \cdot 10^{-12}$ m

Si el fotón y el electrón se comportan como dos partículas que efectúan una colisión elástica, se conservara la cantidad de movimiento y la energía. Haciendo uso de los principios de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento en términos relativistas (por la gran velocidad de las partículas) y suponiendo para el fotón una cantidad de movimiento $p = h/\lambda$, al resolver el sistema correspondiente se obtiene el siguiente resultado: $\lambda - \lambda' = h(1 - \cos\theta)/m.c$



resultado que coincide con la expresión obtenida experimentalmente por Compton, siendo $\lambda_c = h/m.c$

Cuando la difusión tiene lugar con un ángulo de 90° esta expresión toma la forma:

$$\lambda - \lambda' = h/m.c = \lambda_c$$

y al sustituir h (constante de Planck), m (masa del electrón en reposo) y c (velocidad de la luz) aparece un valor para λ_c de $2,42 \cdot 10^{-12}$ m, que coincide con el valor experimental medido por Compton.

El fotón que choca con el electrón se comporta como si fuese una partícula, siendo su cantidad de movimiento por: $p = h/\lambda$, y lleva asociado una onda electromagnética de longitud de onda λ . La ecuación $\lambda = h/p$ reúne el aspecto ondulatorio (λ) y el aspecto corpuscular (m) del fotón: expresa su doble naturaleza.

7. DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

Se llega al año 1923 con fenómenos luminosos que son interpretados mediante una teoría ondulatoria (interferencia, difracción, ...) mientras que otros hay que interpretarlos con la teoría corpuscular (efecto fotoeléctrico, Compton, ...). Parece que nos encontramos ante un dilema: unos experimentos indican que la luz se comporta como una onda (con una longitud de onda λ) y otros como un chorro de corpúsculos (con una cantidad de movimiento $p = h/\lambda$), teniendo que considerar que la luz presenta doble naturaleza de onda y corpúsculo, según las condiciones del fenómeno que se observe. Así, cuando la longitud de onda de la luz es mayor o de un valor parecido al del tamaño del objeto que bordea o del orificio por el que atraviesa, presenta el comportamiento de onda (aparece la difracción) mientras que si la longitud de onda es muy pequeña comparada con el tamaño del objeto sobre el que incide o agujero por el que pasa, tiene el comportamiento de corpúsculo (aparecen las sombras). Esto hizo pensar al físico L. De Broglie si la materia se podría comportar como una onda, es decir, si toda partícula en movimiento tendría asociada una onda.

Vamos a encontrar la longitud de onda asociada a un fotón partiendo de la energía, que viene dada: γ si consideramos la onda asociada al fotón, por la ecuación de Planck: $E = h \cdot f$, siendo f la frecuencia de la onda asociada, y

γ si lo consideramos como partícula, por la ecuación de Einstein: $E = m \cdot c^2$ (siendo m la masa que se transforma en energía). Igualando ambas expresiones resulta:

$$\begin{aligned} h \cdot f &= m \cdot c^2 & h \cdot c / \lambda &= m \cdot c^2 \rightarrow \lambda &= h/m \cdot c \\ f &= c / \lambda \end{aligned}$$

Esta fórmula, que es válida para el caso de los fotones, fue generalizada por De Broglie en 1924 “a toda partícula en movimiento, estableciendo el siguiente principio: a todo corpúsculo en movimiento (electrón, protón, molécula,...) le corresponde una onda de longitud de onda

$$\lambda = h/(m \cdot v), \text{ siendo } m \text{ la masa de la partícula y } v \text{ su velocidad, y frecuencia } f = E/h.$$

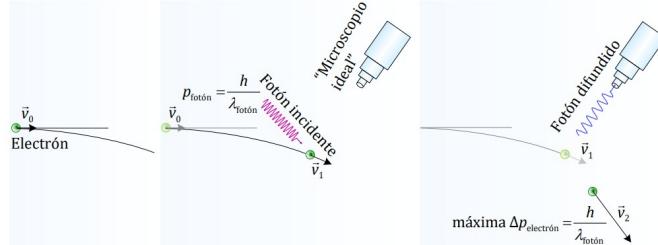
Esta suposición teórica fue confirmada en el año 1927 por Davisson y Germer al hacer incidir un haz de electrones sobre un cristal metálico, obteniendo imágenes de difracción, con una λ que se corresponde con la de la ecuación de De Broglie.

Una manifestación de la dualidad onda-corpúsculo de la radiación y de la materia es el principio de incertidumbre de Heisenberg. Como las ondas no pueden localizarse en el espacio, la medida de la posición de una partícula con características ondulatorias está sometida a una incertidumbre y la onda asociada a la partícula representa la probabilidad de encontrarla en un punto determinado.

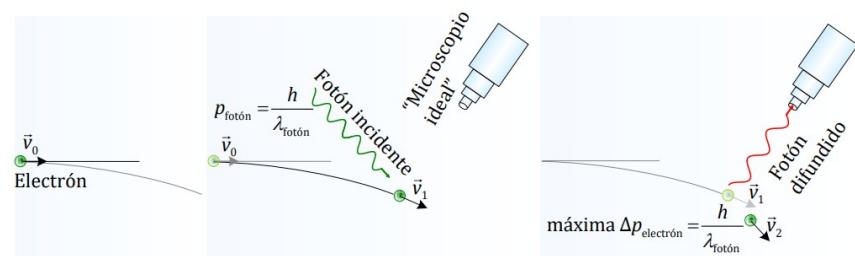
8. PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

En el mundo macroscópico es posible observar un fenómeno y medir sus propiedades utilizando instrumentos que no influyen apreciablemente en el resultado de la medida. Así, cuando medimos con un termómetro la temperatura del agua de una piscina, el hecho de introducir el termómetro en el agua no causa un error apreciable en la medida. Sin embargo, en el mundo atómico resulta imposible evitar las perturbaciones producidas por los instrumentos de medida. Para explicar este hecho, Heisenberg efectuaba el siguiente “experimento mental”: Supongamos un cañón de electrones capaz de disparar un electrón horizontalmente en un recinto totalmente vacío. Para observar su trayectoria disponía de una fuente que emitía fotones de la longitud de onda deseada y de un microscopio ideal que funcionaba con cualquier radiación del espectro.

Según la mecánica clásica, la partícula seguiría una trayectoria parabólica. Pero para “ver” al electrón debe incidir sobre él un fotón, que posee la cantidad de movimiento de: $p_{\text{fotón}} = h/\lambda_{\text{fotón}}$. Esto, por efecto Compton, da lugar a un cambio en la trayectoria y en la velocidad del electrón, variando su cantidad de movimiento, $\Delta p_{\text{electrón}}$, variación que puede llegar a coincidir con la cantidad de movimiento del fotón, pudiendo ser: $\Delta p_{\text{electrón}} = h/\lambda_{\text{fotón}}$.



Si intentamos minimizar la variación de la cantidad de movimiento del electrón, utilizando fotones de menor energía, a aumentar λ también aumenta la difracción y resulta más difícil observar al electrón, es decir: determinar su posición.



Heisenberg, en el año 1927, generalizó este resultado en el conocido **principio de incertidumbre**, también llamado de indeterminación, que dice que existen pares de magnitudes físicas que, al medirlas simultáneamente, todo incremento de precisión en la medida de una de ellas entraña una menor exactitud en la medida de la otra, de tal modo que el producto de los errores cometidos en la medida simultánea de dos magnitudes asociadas es igual o mayor a $h/2\pi$, siendo h la constante de Planck.

Estas magnitudes asociadas tienen las dimensiones de energía por tiempo. Ejemplos característicos de tales parejas de magnitudes son:

posición – momento lineal

energía (emitida por una partícula) – tiempo (en que se emite la energía)

siendo el producto de sus errores: $\Delta x \cdot \Delta p > h/2\pi$

$$\Delta x \cdot \Delta p > h/2\pi$$

LUZ	TEORÍA ONDULATORIA HUYGENS	<p>ÉTER. Medio elástico presente en Los medios materiales.</p> <p>PROPAGACIÓN RECTILÍNEA. Formación de sombras</p> <p>REFLEXIÓN</p> <p>REFRACCIÓN</p> <p>VELOCIDAD DE LA LUZ ES MAYOR EN EL AIRE QUE EN EL AGUA</p>
	TEORÍA CORPUSCULAR NEWTON	<p>NO DIFRACCIÓN. Si es onda, por difracción se vería detrás de un obstáculo</p> <p>PROPAGACIÓN RECTILÍNEA.</p> <p>REFLEXIÓN</p> <p>REFRACCIÓN</p> <p>VELOCIDAD DE LA LUZ ES MAYOR EN EL AIRE QUE EN EL AIRE</p>

AÑO	ONDULATORIO	CORPUSCULAR
1801	YOUNG. Interferencia de la luz	
1816	FRESNELL. Explica la difracción	
1850	FOUCAULT. Demostró que la velocidad de la luz es mayor en el aire	
1873	MAXWELL. Ecuaciones. Obtención de ondas con un circuito LC (velocidad de las ondas obtenidas = velocidad de la luz)	
1885	HERTZ. Ondas electromagnéticas y luminosas de igual naturaleza	
1887		HERTZ. Efecto fotoeléctrico
1923		Efecto Compton

TEORÍA ONDULATORIA	TEORÍA CORPUSCULAR
PROPAGACIÓN RECTILÍNEA REFLEXIÓN	PROPAGACIÓN RECTILÍNEA REFLEXIÓN
INTERFERENCIA, DIFRACCIÓN, POLARIZACIÓN	
	EFFECTO FOTOELÉCTRICO E COMPTON