

1.	Primeras teorías sobre la naturaleza de la luz.	1
1.1	Triunfo de la teoría ondulatoria. Ondas electromagnéticas:	2
2.	Teoría cuántica.	3
3.	Efecto fotoeléctrico.	5
3.1	Leyes del efecto fotoeléctrico:	5
3.2	Teoría fotonica de la luz:	7
3.3	Interpretación del efecto fotoeléctrico:	7
4.	Naturaleza ondulatoria de la materia: dualidad onda-corpúsculo	9
5.	Mecánica cuántica:	9

1. PRIMERAS TEORÍAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ.

Las primeras teorías sobre la naturaleza de la luz posiblemente fuesen debidas a Euclides (330 a 275 a. de C.), que suponía que *la luz era una especie de tentáculo lanzado por el ojo hacia el objeto que se estaba viendo en ese momento*. Euclides enunció las leyes de la reflexión de la luz. Esta teoría explicaba satisfactoriamente la razón por la cual dejamos de ver un objeto cuando otro se interpone en su camino hacia el ojo, pero no explica muchas otras cosas, como, por ejemplo, la falta de visión en la oscuridad.

Esta teoría se mantuvo hasta que alrededor del año 1000 de nuestra era, el filósofo árabe Alhacen afirmó que *la luz se dirige desde la fuente que la produce hasta nuestros ojos después de ser reflejada por los objetos que vemos*. Esta teoría está ya muy cercana a la concepción actual que tenemos sobre el fenómeno de la visión: Cuando la luz incide sobre un objeto opaco, parte de ésta es absorbida por el objeto (por eso los objetos se calientan al iluminarlos) y el resto es reflejado por la superficie. Esta luz reflejada es la que observamos, es decir, somos capaces de "ver" los objetos gracias a la luz que reflejan. La fracción de luz que se refleja en la superficie de un cuerpo depende de la longitud de onda; por ejemplo, la superficie de un objeto puede absorber preferentemente la porción roja del espectro luminoso y reflejar la mayor parte de la porción azul del espectro. Dicho objeto aparecerá ante nuestros ojos como un cuerpo de color casi azul (por faltar a la luz reflejada por ese cuerpo la porción roja, que "contrapesaba" la porción azul). Si un objeto resulta a nuestros ojos blanco, es porque dicho objeto no absorbe casi ninguna de las frecuencias de la luz que sobre el incide y por tanto la luz que refleja tiene todos los colores (frecuencias) intactas (el blanco es la composición de todos los colores). Si un objeto nos parece negro es porque dicho objeto absorbe casi todas las frecuencias de la luz que le llega y por tanto apenas refleja nada de luz. (¿Qué ropa te parece más adecuada para el verano, una camiseta blanca o una negra, gustos aparte?).

En el siglo XVII los progresos en óptica son impresionantes y ya en época de Newton existían 2 teorías claramente diferenciadas sobre la naturaleza de la luz:

-La teoría corpuscular, propuesta por Newton, según la cual la luz es un flujo de partículas proyectadas por el cuerpo emisor que eran capaces de atravesar los materiales transparentes y se reflejaban en los opacos.

La teoría ondulatoria, debida a Huygens, que afirmaba que la luz era una onda.

La existencia de sombras nítidas, que prueban que la luz viaja en línea recta (como lo haría una partícula ligera lanzada a gran velocidad), el fenómeno de la reflexión (la luz se refleja exactamente igual que lo haría una pelota de tenis al chocar contra un cuerpo) hizo que la teoría propuesta por Newton triunfara sobre la ondulatoria. Ésta última teoría se encontraba además con otra objeción: todas las ondas conocidas hasta entonces eran ondas mecánicas, como el sonido o las ondas en una cuerda, ondas que necesitan un medio material para poder propagarse. Sin embargo, la luz es capaz de propagarse en el vacío, cosa inexplicable para los científicos de la época si aceptaban que la luz era una onda como las demás. Para evitar esta dificultad, Huygens tuvo que imaginar la existencia de un sustancia denominada *éter*, material sutil que

llenaba todo el espacio, incluso el vacío, a través del cual se propagaba la luz y, sin embargo, no obstaculizaba el movimiento de los planetas.

A pesar de todas estas dificultades, la teoría ondulatoria también tenía sus seguidores, pues explicaba las diferencias de color como diferencias de frecuencia y preveía los fenómenos de interferencia.

Sin embargo, y debido probablemente al gran prestigio de Newton, la teoría corpuscular fue la comúnmente aceptada para interpretar los fenómenos luminosos.

1.1 TRIUNFO DE LA TEORÍA ONDULATORIA. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS:

La teoría ondulatoria volvió a resurgir en el siglo XIX gracias a los trabajos del científico inglés Thomas Young (1773-1829), su colega francés August Fresnel (1788-1827) y Foucault (1819-1868).

Young consiguió una buena confirmación de la teoría ondulatoria salvando la principal objeción que se le imponía en la época de Newton. Con su famoso experimento de la doble rendija consiguió demostrar que la luz también sufría difracción como cualquier otra onda, lo que ocurre es que al ser la longitud de onda muy pequeña la difracción es difícil de observar.

También fueron Young y Fresnel los que establecieron que la luz debía tratarse de una onda transversal y no longitudinal, por la observación de un fenómeno conocido como polarización que no sufren las ondas longitudinales y sí la luz y las ondas transversales.

La teoría ondulatoria quedó aún más reforzada por Foucault, el cual en 1850 ideó un método para medir la velocidad de la luz en distancias cortas. Así se pudo conocer que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire, confirmando la interpretación que Huygens realizase años antes de la refracción como fenómeno ondulatorio (para poder explicar la refracción mediante el modelo corpuscular de Newton era necesario admitir que la velocidad de las partículas de luz en el agua era mayor que en el aire).

La teoría ondulatoria transversal estaba bastante bien establecida a mediados del siglo XIX, pero aún tenía un importante problema por resolver referente al medio de transmisión, el denominado "éter", que por seguir los científicos pensando que la luz era como el resto de las ondas mecánicas se veían obligados a admitir. Las propiedades de supuesto éter debían ser, además, absolutamente increíbles: Debía llenar todo, hasta el vacío incluso, muy elástico, para que la luz pudiese alcanzar en él tal velocidad, muy poco denso ya que no podía ni siquiera detectarse en el vacío, tan rígido como el acero y sin embargo no oponía resistencia a que los materiales se moviesen en él.

Esta gran dificultad fue resuelta cuando se aceptó para la luz la teoría electromagnética ideada por Maxwell en 1873. Según Maxwell el paso de un tren de ondas luminosas implica *fluctuaciones periódicas de campos eléctricos y magnéticos y no vibraciones de partículas materiales*.

El pleno significado de la teoría de Maxwell no se alcanzó, sin embargo, hasta que un poco más tarde Hertz, utilizando un circuito oscilante conseguía producir ondas electromagnéticas cuyas propiedades coincidían con las de la luz, quedando establecido que las ondas luminosas son ondas electromagnéticas que reciben uno u otro nombre especial dependiendo de la longitud de onda de dicha onda electromagnética: Rayos X, luz visible, infrarrojo, etc. (Ver tabla 1.-). La teoría del éter encontraría su muerte definitiva en el experimento de Michelson y Morley, al intentar encontrar éstas variaciones en la velocidad de la luz dependiendo de que la tierra se moviera en un sentido u otro con respecto al espacio (al éter). Si dicho éter existiese, el resultado de dicho experimento sería semejante a intentar medir la velocidad de un coche desde una bicicleta que va en su mismo sentido u otra bicicleta que va en sentido contrario al coche. Las dos velocidades serían distintas. Estos dos investigadores encontraron que la velocidad de la luz era siempre la misma, se mueve la tierra hacia donde se mueva.

NOMBRE	FRECUENCIA	DESCRIPCIÓN
Ondas de radio u ondas Hertzianas	hasta $3 \cdot 10^9$ Hz.	Se producen mediante circuitos eléctricos oscilantes y reciben distintos nombres según frecuencias crecientes (mayor λ , menor ν): ondas de radio largas, ondas de radio de AM, ondas de TV y radio FM y ondas de radio cortas (como el radar)
Ondas microondas	desde $3 \cdot 10^9$ hasta $3 \cdot 10^{11}$ Hz (entre 3 y 300 GHz)	Se producen mediante un tubo electrónico denominado <i>Klystron</i> y es absorbida por las molécula en rotación, por lo que se pueden usar para dar energía a moléculas en (líquidos, con libertad de rotación, sin actuar sobre los sólidos.

Rayos Infrarrojos	entre $3 \cdot 10^{11}$ y $4 \cdot 10^{14}$	Se producen por vibraciones de átomos y moléculas y son de gran aplicación en Medicina, Astronomía e Industria.
Luz visible	Entre $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz (rojo) y $7,7 \cdot 10^{14}$ Hz (violeta)	Se corresponde a una longitudes de onda comprendidas entre 7800 y 3900 Amstrong. Es la gama de radiaciones para las cuales es sensible nuestra retina.
radiación ultravioleta	de $8 \cdot 10^{14}$ hasta $3 \cdot 10^{17}$ Hz	Se produce artificialmente por medio de descargas eléctricas en el seno de átomo y moléculas.
Rayos X	entre 10^{16} y 10^{23} hz	Se solapa con la zona de royo γ y con la de ultravioletas. Los de mayor frecuencia, llamados rayos X duros, son peligrosos, ya que destruyen los tejidos y se usan en el tratamiento contra el cáncer.
Rayos γ	mayor de 10^{20} Hz	Son de origen nuclear, ya que se producen en las desintegraciones de elementos radiactivos. Su poder destructivo y penetrabilidad son enormes, produciendo daños irreparables en células y tejidos.

Tabla 1.- Clasificación de la radiación electromagnética según su frecuencia. Los límites son aproximados y existen numerosas zonas de solapamiento.

2. TEORÍA CUÁNTICA.

Los primeros problemas para la física clásica comienzan cuando los físicos intentan resolver un problema planteado por **Gustav Robert Kirchhoff** (1824-1887), el problema del **cuerpo negro**, expresión acuñada por el propio Kirchhoff para referirse a un cuerpo emisor perfecto.

Se sabe que los cuerpo calientes emiten energía radiante en forma de ondas electromagnéticas (de hecho, si colocamos un cuerpo caliente dentro de otro al que no toca, para evitar que el calor se propague por **conducción**, y del que hemos extraído todo el aire, para evitar que el calor se propague por **convección**, al cabo de un tiempo el cuerpo y el recipiente que lo contiene están en **equilibrio térmico**, a igual t, lo que significa que el calor se ha transmitido por **radiación**) ,aunque esta energía solo corresponde al espectro visible (y es entonces cuando la vemos y la llamamos luz), si el cuerpo alcanza una cierta temperatura (Carbón al rojo, filamento de una bombilla). También comentábamos anteriormente que los cuerpos son capaces de absorber parte (o toda) la radiación que incide sobre ellos. Un cuerpo ideal que absorbiera toda la energía radiante que le llegara se denomina en física un **cuerpo negro**.¹

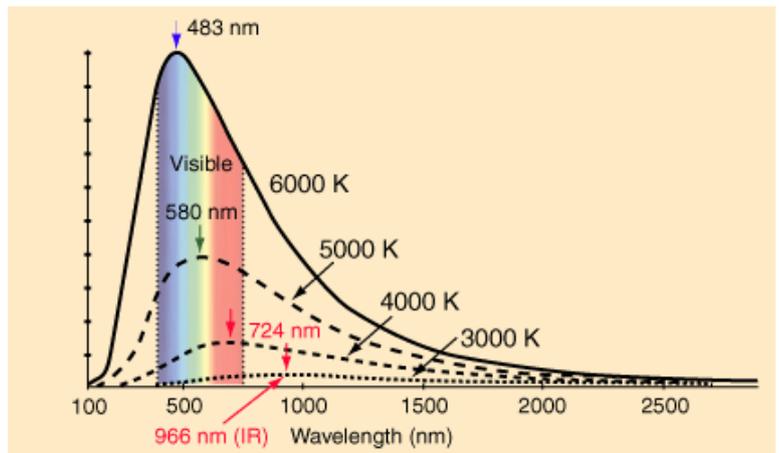


Figura 1.- Intensidad de emisión de un cuerpo negro en función de la longitud de onda, a dos temperaturas distintas.

Si calentamos un cuerpo negro, como el cuerpo del ejemplo anterior, se puede medir la intensidad de energía irradiada por el agujero, $I = \text{potencia irradiada} / \text{área del orificio}$, en función de la temperatura, pudiéndose realizar gráficas como las de la figura 1.-. En ellas se representa la intensidad de la radiación emitida, según su frecuencia, por el cuerpo negro cuando éste se encuentra a 2 temperaturas concretas. En dichas gráficas puede observarse las denominadas *leyes de la radiación de un cuerpo negro*, que consisten en:

- Que para una temperatura dada, la potencia irradiada posee un único máximo.

¹ Se llama así porque, al absorber toda la radiación que le llega, nosotros lo vemos de color negro. Ningún cuerpo real es un cuerpo negro exactamente, pero se puede obtener un cuerpo negro de un modo aproximado construyendo un horno de cualquier material resistente al calor, como pudieran ser ladrillos refractarios, que se recubre en su interior con negro de humo, que es el carbón que se desprende en el humo de las combustiones. Si hacemos un pequeño orificio en el horno y hacemos incidir por él radiación, ésta, después de múltiples reflexiones con las paredes del horno, quedará totalmente absorbida y no saldrá por el orificio nada de lo que entró. Un cuerpo , como el cuerpo negro, que absorbe toda la energía que le llega, es a su vez un *emisor perfecto*, emitiendo cuando se calienta toda la radiación que produce al exterior.

- Que a mayor temperatura, la potencia emitida aumenta para todas las frecuencias.
- Que la frecuencia a la que se produce el máximo de emisión aumenta al aumentar la temperatura.

Estos aspectos fueron estudiados experimentalmente y dieron lugar a 2 leyes.

La primera, la ley de **Stefan-Boltzmann**, nos habla de la potencia total emitida por un cuerpo negro a una cierta temperatura y es la siguiente:

“la energía **total** emitida en la unidad de tiempo por unidad de superficie del cuerpo negro es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, es decir:

$$W = \sigma T^4$$

Siendo $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{T}^4$ la denominada constante de Stefan-Boltzmann”

Esta ley se puede obtener integrando la expresión de la curva que describe cómo varía la potencia irradiada (W/m^2) (deducida empíricamente por Planck, su expresión se encuentra en la nota al pie) con respecto a la longitud de onda λ , que varía entre 0 e ∞ , manteniendo la T como una constante, para hallar el área total de la curva, que sería la energía total emitida por unidad de superficie y tiempo.

$$\int_0^{\infty} \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

Con esta ley se puede determinar, por ejemplo, la temperatura de una estrella midiendo la potencia por unidad de superficie emitida.

La segunda ley experimental nos relación dónde alcanza el máximo (a qué longitud de onda) la radiación del cuerpo negro según sea la T del cuerpo. Es la ley del **desplazamiento de Wien**:

“La longitud de onda de la radiación del cuerpo negro para la cual la energía es máxima (λ_{max}) es inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Es decir:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{cte} = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Se ve en la figura 5 que a mayor T del cuerpo negro, la λ_{max} se alcanza antes. Con los datos adecuados Wien demostró que ambas magnitudes eran inversamente proporcionales.

Los intentos de explicar la radiación de una cavidad usando la física clásica no tuvieron éxito², hasta que, en 1900, el físico austriaco Max Planck presentó una teoría que suponía una ruptura radical con las ideas imperantes hasta entonces³ y que afirmaba que la energía que un cuerpo absorbe o emite sólo podía tener determinados valores, múltiplos de una cantidad de energía fundamental, a la que Planck denominó *cuanto*, de valor hf , siendo h la denominada constante de Planck, de cuyo valor es igual a $6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, y f la frecuencia de la radiación emitida o absorbida por el cuerpo. Así, la energía que un cuerpo puede intercambiar con otro mediante la emisión o absorción de una radiación electromagnética viene dada por:

$$E = nhf$$

Con la hipótesis de los cuantos, Planck llegó a explicar perfectamente la radiación del cuerpo negro. Sin embargo, a pesar de este éxito, la teoría cuántica no fue aceptada por los científicos de la época (el mismo

²El primer intento fue del propio Wien, que supuso que la radiación electromagnética era producida por osciladores moleculares cuyas frecuencias estaban distribuidas de acuerdo con una ley estadística clásica, la ley de distribución de Maxwell (que tan bien funciona en los gases ideales). Resultó que la función obtenida con ese modelo se adaptaba bien al comienzo de la curva de la figura 5, es decir, para λ bajas.

Otro intento desde la perspectiva de la física clásica se debió a Rayleigh y Jeans, 2 investigadores británicos que se basaron en el principio de equipartición de energía. (la energía se reparte por igual entre todos los modos de vibración de los osciladores moleculares responsables de la emisión electromagnética). Dicha teoría sólo concordaba con los datos experimentales a longitudes de onda altas (al final de la gráfica) y fallaba a λ pequeñas (frecuencias elevadas, hacia el UV). A frecuencias ν altas, como predecía un aumento de I con f^2 no tiene máximo, ni límite, por lo cual la energía irradiada I a medida que la frecuencia crece podría llegar a ser infinita, efecto denominado como la "catástrofe ultravioleta" (si esta teoría fuese cierta, que no lo es, la emisión ultravioleta de los cuerpos llevaría consigo una energía infinita, que destruiría todo a su alrededor). Es sólo una catástrofe imaginaria.

³ Rayleigh y Jeans habían supuesto que los átomos de las paredes del cuerpo negro, que al calentarlos entraban en vibración, podían vibrar a cualquier frecuencia con M.A.S. y por tanto emitir radiación de cualquier frecuencia (Tener en cuenta que *cualquier carga acelerada emite energía en forma de radiación electromagnética*, según la teoría que unos años antes había presentado Maxwell). Planck ajustó los datos experimentales a una ecuación algebraica y demostró que para poder deducir dicha ecuación (y explicar por tanto la radiación del cuerpo negro) había que suponer que los osciladores *sólo podían vibrar a determinadas frecuencias* y por tanto la energía radiada por ellos solo podía tener determinados valores, concretamente la energía radiada por cada oscilador debía ser múltiplo entero de una cantidad fundamental, denominada *cuanto* por Planck, de valor hf , siendo h la denominada constante de Planck, de valor igual a $6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Así, la energía emitida por un oscilador vale:

$$E = nhf$$

siendo n un numero entero y ν la frecuencia del oscilador armónico. Por cierto, y por pura curiosidad, la expresión que Planck encontró se ajustaba a los datos experimentales es la siguiente:

$$I = f(\lambda, T) = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Planck trató de encontrar una teoría alternativa que no fuese tan radical y que explicase la radiación del cuerpo negro sin suponer la discontinuidad de la energía hasta que, después de 7 años de pruebas, se convenció que no había otra posibilidad). Los científicos de la época no podían asumir como cierto que la energía fuese algo discreto, discontinuo (sólo puede tener determinados valores), y no continuo (posibilidad de tomar cualquier valor). Fue Einstein, en 1905, el que, al utilizar la teoría cuántica de Planck para explicar las leyes del efecto fotoeléctrico, dio a dicha teoría el empujón definitivo para su aceptación.

3. EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Hacia 1900 la teoría ondulatoria de la luz parecía tener bases inexpugnables, hasta que un nuevo fenómeno luminoso irrumpió en el mundo de la física. Dicho efecto, observado por casualidad por Hertz en unas experiencias realizadas por él que intentaban confirmar el modelo ondulatorio, hizo necesaria una revisión de dicha teoría ondulatoria, revisión que revolucionó la física.

El efecto descubierto por Hertz, denominado **efecto fotoeléctrico** consiste esencialmente en lo siguiente: Cuando se exponen a la luz ciertas sustancias, especialmente los metales alcalinos, éstas emiten electrones. Este efecto se puede estudiar experimentalmente con el aparato ilustrado en la figura 1.

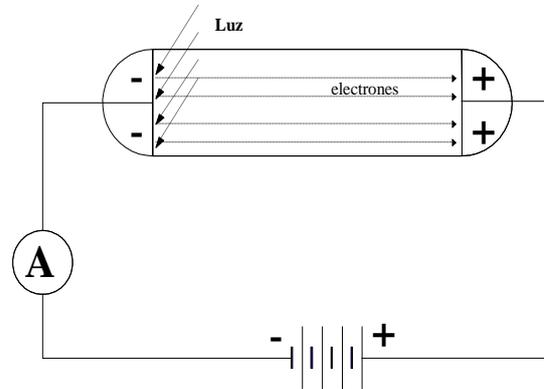


Figura 1 .- Esquema de un aparato para producir el efecto fotoeléctrico. Al incidir la luz en el cátodo, de éste se desprenden electrones que son acelerados por la d.d.p. hacia el ánodo, cerrando el circuito e indicando el amperímetro A el paso de corriente.

En una ampolla de cuarzo (material transparente a casi todas las frecuencias de la luz) en la que se ha hecho un alto vacío, se introducen dos placas metálicas unidas respectivamente a los polos de una batería. Si sobre la ampolla no incide luz alguna, por el circuito no pasa corriente (el amperímetro marcaría cero). Sin embargo, si el cátodo (placa negativa) se ilumina con luz, de dicha placa se desprenden electrones que son atraídos por el ánodo (placa positiva), cerrando el circuito de la batería, con lo que el amperímetro marcaría el paso de corriente. Al flujo de electrones a lo largo del tubo se le denomina corriente fotoeléctrica.

3.1 LEYES DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO:

El estudio detallado de dicho efecto experimentalmente conduce a una serie de leyes, de imposible explicación si damos por buena la teoría ondulatoria para la luz. Las leyes del efecto fotoeléctrico son fundamentalmente:

- [I] Si sobre el cátodo se van proyectando luces monocromáticas (de una sola frecuencia) y ésta se va variando, se observa que el amperímetro deja de indicar el paso de corriente cuando la frecuencia de la radiación incidente es inferior a un valor f_0 , frecuencia denominada frecuencia umbral y que es característica del metal que forma el cátodo.⁴

⁴ Para la gran mayoría de los metales la frecuencia umbral está en la zona de la radiación ultravioleta (o sea, con luz de frecuencia superior a la ultravioleta se obtiene efecto fotoeléctrico, y con luz de frecuencia inferior, como por ejemplo luz infrarroja, no se obtiene dicho efecto) pero para algunos alcalinos como el Cs y el K, es de $5,6 \cdot 10^4$ Hz, que corresponde a la radiación de color verde, y si se ilumina su superficie con naranja (de frecuencia menor), por muy intensa que esta sea no arrancará ningún electrón del metal.

[II] Aumentando el potencial V dado por la batería en el dispositivo esquematizado anteriormente, aumenta el valor de la intensidad de la corriente I medida con el amperímetro, hasta que dicha intensidad alcanza un valor I_s , que se mantiene constante para nuevos incrementos de la tensión. El valor I_s corresponde al caso en que todos los electrones emitidos por el cátodo son recogidos por el ánodo y se llama *Intensidad de corriente de saturación*. También se comprueba que: La intensidad de la corriente de saturación fotoeléctrico es directamente proporcional a la intensidad de la radiación luminosa incidente. (Ver figura 2.-)

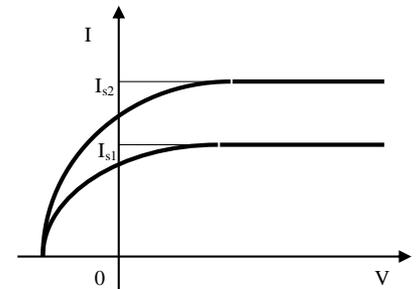


Figura 2.- Variación de la corriente fotoeléctrica en función de la d.d.p de la batería.

[III] Se puede medir experimentalmente el valor de la energía cinética máxima de los electrones emitidos por el cátodo, Para medir esta energía cinética máxima de los electrones emitidos se coloca la batería en oposición (ver figura 3.-), de tal manera que el metal que emite los electrones sea positivo respecto al otro electrodo. En estas condiciones, cuando la batería genera un potencial V_f , potencial de frenado, sólo llegarán al segundo electrodo los electrones cuya energía cinética $1/2mv^2$ sea igual o mayor que $e \cdot V_f$ (trabajo que debe vencer el electrón para llegar al otro electrodo). Aumentando el potencial de frenado, la intensidad de la corriente (nº de electrones que llegan al electrodo) disminuye y llegará un momento en que dicha intensidad se anulará; entonces ni los electrones que salen despedidos del metal con la velocidad máxima v_{max} llegarán al otro electrodo cumpliéndose la ecuación:

$$1/2mv_{max}^2 = eV_f$$

siendo V_f el valor del potencial de frenado que anula la corriente eléctrica.

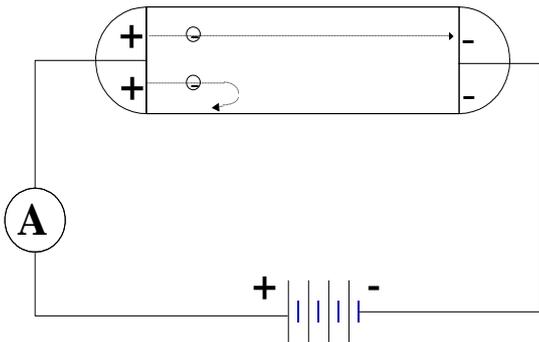


Figura 3.-

Diagrama del montaje necesario para medir el potencial de frenado. se coloca la batería en oposición a la corriente fotoeléctrico y se va variando su potencial hasta que el amperímetro no marca el paso de la corriente. En ese momento, el potencial aplicado es capaz de parar a los electrones más veloces.

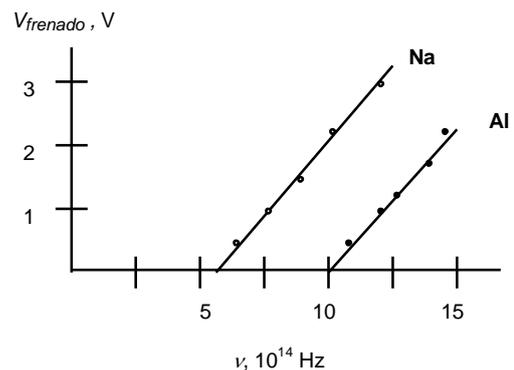


Figura 4.- El potencial de frenado y por tanto de la energía cinética máxima de los electrones ($E_{c,max}$), igual a $e \cdot V_{frenado}$, dependen linealmente de la frecuencia de la luz incidente. las dos tienen la misma pendiente.

Cuando medimos así la E_c máxima llegamos a la conclusión de que, para una determinada frecuencia, la energía cinética máxima de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la luz incidente. Dicha energía cinética máxima si depende de la frecuencia de la radiación, aumentando con ella proporcionalmente.

[IV] También se observa en el experimento que el efecto fotoeléctrico se produce instantáneamente: al incidir luz de una frecuencia superior a la umbral, aunque sea de poca intensidad, instantáneamente el amperímetro indica el paso de corriente.

Todas estas características de la emisión fotoeléctrico eran inexplicables desde la teoría ondulatoria de la luz (o a veces la contradicen claramente). Según la teoría clásica de la luz, la energía cinética máxima de los electrones emitidos debe ser función de la energía de la luz incidente y considerando a ésta como una onda su energía dependerá de su intensidad y no de su frecuencia (Clara contradicción con la III ley comentada anteriormente). Tampoco tenía explicación, dentro del marco de la teoría ondulatoria de la luz, que dicho efecto fuese instantáneo (IV ley): Si la intensidad luminosa fuese menor, debería tardarse más tiempo en acumular la energía necesaria para arrancar el electrón de los átomos del cátodo. La ley I también es inexplicable desde el punto de vista ondulatorio, puesto que si la energía de la luz es proporcional a la intensidad (si fuese una onda), el efecto fotoeléctrico se debería producir a partir de una intensidad dada, no

para cualquier intensidad y a partir de la frecuencia umbral. La ley II no contradice el modelo ondulatorio, pero éste tampoco es capaz de explicarla.

3.2 TEORÍA FOTÓNICA DE LA LUZ:

La explicación satisfactoria de las leyes del efecto fotoeléctrico vino de la mano del científico más genial del Siglo XX: Albert Einstein. En un trabajo publicado en 1905 bajo el título de "Sobre el punto de vista heurístico relativo a la generación y transformación de la luz", Einstein ponía de manifiesto que la teoría de Maxwell se comportaba bien en la descripción del proceso de propagación de la luz y de los efectos ópticos asociados (Reflexión, refracción, interferencias, etc), pero no funcionaba cuando la luz interactuaba con la materia, tal y como ocurría en el efecto fotoeléctrico. Su nueva teoría no se oponía a la de Maxwell en cuanto a la propagación de la luz, sino que explicaba las interacciones de ésta con la materia⁵.

Einstein extendió el concepto de los cuantos a la energía de la luz emitida por un foco, llamando fotones a estos cuantos de luz y siendo $h \cdot \nu$ la energía asociada a cada uno de ellos. Einstein considera la luz como un "chorro" de fotones ("partículas") de energía $h \cdot f$, aunque considera que la teoría ondulatoria de la luz sigue siendo válida en los problemas de propagación (óptica), mientras que en los problemas de interacción luz-materia es necesario recurrir a la teoría cuántica. Así aparece en la luz una doble naturaleza de onda y corpúsculo (el fotón), hecho que se suele recoger con el término dualidad onda-corpúsculo.

El fotón es una partícula caracterizada por su energía $E=h \cdot \nu$ y su cantidad de movimiento $p=m \cdot c$ (el fotón viaja a la velocidad de la luz, claro está); la onda por su frecuencia ν y su longitud de onda λ . Entre estas cuatro magnitudes existen las siguientes relaciones de correspondencia:

$$E = hf$$

$$p = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

3.3 INTERPRETACIÓN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO:

El efecto fotoeléctrico dentro de la teoría fotónica de la luz se interpreta de la siguiente manera:

Cuando un fotón choca con un electrón del metal, es absorbido completamente y su energía, $h \cdot f$, pasa íntegra al electrón. Parte de dicha energía se invierte en arrancar al electrón de la atracción nuclear (la energía necesaria para arrancar a un electrón del metal se denomina E_0 o W , *trabajo de extracción*). El resto de la energía que tenía el fotón pasa al electrón en forma de energía cinética. Así pues, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía tendremos que:

$$hf = W + \frac{1}{2}mv^2$$

$$hf = W + \frac{1}{2}mv^2$$

o bien:

$$\frac{1}{2}mv^2 = hf - W$$

Que es la **ecuación fotoelectrónica de Einstein** para el efecto fotoeléctrico.

Si disminuimos la frecuencia, llegará un momento en que la velocidad será 0 y no habrá emisión. En ese momento, la frecuencia será la frecuencia umbral f_0 y se cumplirá que:

$$hf_0 - W = 0; \text{ Es decir } \Rightarrow W = hf_0$$

⁵ Por cierto, fue éste trabajo el que dio el premio Nobel de Física a Einstein en 1921. Otros dos trabajos de Einstein, publicados el mismo año, 1905, uno sobre el movimiento Browniano, en el que demostraba la existencia de átomos y moléculas y sentaba las bases de una de las ramas más importantes de la física moderna, la termodinámica estadística, y el otro sobre una nueva teoría, la teoría de la relatividad, que cambió de forma radical la visión que la física tenía del mundo, no fueron premiados con ningún otro premio Nobel.

Así pues, cuando la frecuencia de la radiación f sea inferior a f_0 , como entonces $h \cdot f < W$ y ningún electrón podrá ser arrancado de la superficie del metal (la energía cinética siempre es una magnitud positiva⁶).

Si sustituimos en las ecuaciones anteriores el valor del W por $h \cdot \nu_0$, llegaremos a:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_0)$$

Así se comprenden todas las leyes del efecto fotoeléctrico:

- I) Si la radiación es de frecuencia ν inferior a la frecuencia umbral, f_0 , la energía del fotón será $h \cdot \nu$, menor que la energía necesaria para arrancar al electrón del átomo ($W = h \cdot f_0$). El trabajo de extracción y la frecuencia umbral sólo son función del material del cátodo.
- II) la intensidad de corriente de saturación (número de electrones que circulan por el circuito por segundo) sólo dependerá de la intensidad de la luz, que indica el nº de fotones que porta la luz. A mayor intensidad, mayor nº de fotones llegan al cátodo, mayor nº de choques con los electrones, mayor nº de electrones emitidos. El nº de electrones emitidos, la intensidad de corriente de saturación, será proporcional a la intensidad de la luz y no dependerá de la frecuencia de esta.
- III) la energía cinética máxima de los electrones emitidos será una función lineal de la frecuencia de la luz (energía de los fotones incidentes), como indican las ecuaciones anteriores, y no dependerá de la intensidad de la luz (del nº de fotones que choquen).
- IV) el efecto fotoeléctrico será instantáneo pues es producto de un choque fotón- electrón y este es instantáneo.

La confirmación de la teoría fotónica de Einstein vendría más tarde con el descubrimiento del denominado **Efecto Compton**, efecto consistente en el choque de un fotón de alta energía (procedente de una fuente de Rayos X, por ejemplo) con un electrón de un átomo. Entre ambos se produce un choque elástico de tal modo que el electrón sale despedido del átomo en el que se encontraba y el fotón, a ceder parte de su energía (que es $h \cdot f$) al electrón en el proceso del choque, sale con una energía menor y por tanto, como $E = h \cdot f$, con una frecuencia menor, f' . Se puede observar experimentalmente (y teóricamente, aceptando la hipótesis

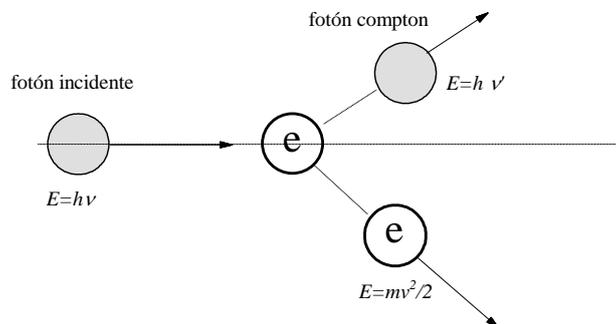


Figura 6. Esquema del Efecto Compton. Un fotón de alta energía choca contra un electrón y en el proceso del choque se conserva la cantidad de movimiento.

⁶ Lo tratado en el cuerpo del texto es una simplificación.. En realidad, como los electrones de la superficie del metal **no** tienen igual grado de atracción nuclear, no necesitan todos la misma energía, W para ser arrancados. Teniendo en cuenta la ecuación fotoeléctrica, se deduce que cuando el W sea mínimo, la velocidad de los electrones será máxima. Por lo tanto, la energía cinética máxima de los electrones será:

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = hf - W_{\min}$$

es decir, la energía cinética máxima de un electrón es función lineal de la frecuencia de la radiación incidente y no depende de su intensidad. En sentido estricto, el **trabajo de extracción** se define como el W_{\min} . Según eso, para una frecuencia $\nu = \nu_0$ (frecuencia umbral) no hay emisión, $1/2mv_{\max}^2 = 0$ y de acuerdo con la ecuación anterior:

$$hf_0 - W_{\min} = 0; \text{ Es decir } \Rightarrow W_{\min} = hf_0 = \text{trabajo de extracción}$$

Si sustituimos en las ecuaciones anteriores el valor de la energía cinética máxima por $e \cdot V_f$ y W_{\min} por $h \cdot \nu_0$, llegaremos a:

$$eV_f = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h(f - f_0)$$

Si en un sistema de coordenadas tomamos como abscisas las frecuencias ν y como ordenadas los valores correspondientes de V_f , la gráfica de la ecuación anterior es una recta de pendiente igual a h/e (ver figura 4.,- al final) . Conocida dicha pendiente y el valor de la carga del electrón e se puede medir el valor de h con gran precisión, resultando ser de $6,56 \cdot 10^{-34}$ J·s. La intersección de dicha recta con el eje de abscisas nos da el valor de la frecuencia umbral f_0 del metal considerado.

cuántica) que la diferencia entre las frecuencias del fotón antes y después del choque, $f'-f$, no depende de la sustancia sobre la cual se hace incidir la radiación ("el blanco", la que contiene los electrones) sino sólo del ángulo de difusión (Figura 6.-)

4. NATURALEZA ONDULATORIA DE LA MATERIA: DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

Sabemos que la luz presenta a la vez un carácter corpuscular (efecto fotoeléctrico y efecto Compton) y un carácter ondulatorio (fenómenos de interferencia y difracción). Esta doble naturaleza de la luz se muestra en las ecuación:

$$p = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

donde aparece, por un lado, la cantidad de movimiento, una magnitud asociada a las partículas (son las que tienen masa, mv), y por otro lado la longitud de onda, magnitud típicamente ondulatoria y que no tienen las partículas. Si lo que tradicionalmente se había considerado una onda, la luz, tenía carácter corpuscular, ¿no tendrían las partículas también carácter ondulatorio?. Esta fue la idea que en su tesis doctoral de 1924 lanzó el historiador Louis de Broglie: *Toda partícula, en su movimiento, lleva asociada una onda cuya longitud de onda vale*

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

siendo h la constante de Planck. Esta hipótesis (hoy día totalmente aceptada, al igual que la de Planck) afirma que cada partícula en su movimiento lleva una onda asociada, "pegada a ella", cuya longitud de onda viene dada por la ecuación anterior. Dicha ecuación es igual que la relación longitud de onda-cantidad de movimiento para los fotones, con la diferencia de que éstos viajan a la velocidad de la luz c , mientras que el resto de las partículas viajan a velocidades inferiores v . Esta teoría de De Broglie contaba con una dificultad para su aceptación. ¿Si una partícula en su movimiento lleva asociada una onda, cómo era que nunca se había detectado ésta?. la explicación era sencilla. Supongamos la onda asociada a una bola de billar de masa 1 kg que se mueve con una velocidad de 10 m/s. De acuerdo con la expresión anterior, la longitud de onda vale $6,6 \cdot 10^{-25}$ Amstrong. Para detectar esta onda asociada habría que realizar un experimento que demostrase la existencia de la onda, por ejemplo, se podría intentar difractarla, pero para realizar la difracción la rejilla debe ser del mismo orden que la longitud de onda y !no existen rejillas de ese tamaño, menor incluso que el radio atómico!. Su detección para partículas pesadas es imposible y como tienen esa longitud de onda tan pequeña, podemos seguir tratando las bolas de billar como Newton lo hacía, como partículas. Sin embargo, para las "partículas" pequeñas (No sé si os habéis dado cuenta de que sigo hablando de "partículas" y "ondas", aunque nada en este mundo son ni una cosa ni la otra. Seguiré hablando de partículas si el objeto tiene unas propiedades típicas de partícula y para estudiarlo no se necesita usar la onda asociada a él, igual que hablaré de ondas si éstas no tienen un comportamiento particular, como la luz), como un electrón que tenga una energía cinética de 150 eV, cuya masa es de $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, la longitud de onda de la onda asociada es de 1 Amstrong, longitud de onda comparable a la de los rayos X y que se puede detectar por difracción. De hecho, en 1926 Davisson y Germer consiguieron **difractar un haz de electrones**, encontrándose con que la longitud de onda asociada a los electrones era justamente la predicha por la ecuación de De Broglie. Posteriormente, muchos experimentos han confirmado dicha hipótesis e incluso el carácter ondulatorio de los electrones ha llevado a avances técnicos como el microscopio electrónico (con el que se pueden conseguir hasta 100.000 aumentos). Para los electrones (y otras partículas de masa pequeña) despreciar su carácter ondulatorio es absurdo y de hecho a los electrones y demás partículas pequeñas ni se les llama partículas ni ondas sino **entes cuánticos**, ya que las ideas de mecánica clásica no son válidas para ellos y se tuvo que desarrollar una teoría nueva que los estudiase: **La mecánica cuántica**.

5. MECÁNICA CUÁNTICA:

La mecánica cuántica, formulada independientemente y de forma distinta, por un lado por Werner Heisenberg (a su formulación se la denomina a veces mecánica de matrices, ya que hace un uso intensivo de este instrumento matemático), y por otro lado y simultáneamente por Erwin Schrödinger (la formulación denominada mecánica ondulatoria, por el parecido de su ecuación fundamental con la ecuación clásica de ondas), sirve para estudiar los problemas físicos en los que intervienen entes cuánticos, partículas pequeñas con un fuerte carácter ondulatorio. Aunque su estudio es matemáticamente muy complejo, señalaremos aquí a grandes rasgos cuáles son sus características más importantes:

1.- La mecánica cuántica renuncia desde el principio a hacer una descripción determinista del problema físico de que se trate. Una descripción determinista es la que se realiza con la mecánica clásica de Newton: conocida la velocidad y la posición de un objeto en un momento determinado y las fuerzas que actúan sobre él, se puede predecir cuál será su movimiento en el futuro con toda la precisión que se desee. Así podemos decir dónde caerá un proyectil con movimiento parabólico y qué tiempo tardará en caer o donde estará la luna dentro de mil años, problemas que la mecánica clásica puede resolver, pues ambos, proyectil y luna, son objetos macroscópicos, grandes. Sin embargo, la mecánica cuántica solo nos dirá qué **probabilidad** existe de encontrar un electrón (o cualquier otra partícula cuántica) en una determinada posición. No puede darnos más información⁷.

2.- Otra de las consecuencias más importantes de la mecánica cuántica está contenida en el denominado **principio de Incertidumbre**, formulado por Heisenberg en 1927. Heisenberg propone como postulado de la nueva mecánica el que ciertos pares de magnitudes físicas, como la posición y la cantidad de movimiento, o la energía y el tiempo (concretamente, aquellos pares de magnitudes cuyo producto tenga unidades de **acción**, energía tiempo. Dichos pares se llaman magnitudes conjugadas), no pueden medirse con total exactitud, pues cuanto más exactamente se mide una de ellas, con menos exactitud se podrá determinar la otra. Concretamente:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

siendo Δx la incertidumbre en la posición y Δp la incertidumbre en la cantidad de movimiento medida. (la incertidumbre es el error absoluto cometido en una medida.

Así, si decimos que un objeto mide $215 \text{ cm} \pm 15 \text{ cm}$, la incertidumbre, el error absoluto de la medida es 15 cm. Veamos a continuación un ejemplo concreto: la relación de incertidumbre aplicada a una partícula de $1 \text{ mg} = 10^{-6} \text{ kg}$ se escribe:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{h}{2\pi m} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{2\pi 10^{-6}} = 10^{-28} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

lo cual nos dice que si conocemos la posición de la partícula con una incertidumbre de 10^{-14} m , la incertidumbre en la determinación de la velocidad será de unos 10^{-14} m/s , valores insignificantes para partículas de masa 1 mg o mayor.

Sin embargo, para el caso del electrón (del orden de $m = 10^{-30} \text{ kg}$)

$$\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{h}{2\pi m} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{2\pi 10^{-30}} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

de modo que una incertidumbre de 10^{-10} m (orden de magnitud del radio atómico) lleva consigo una incertidumbre de 10^6 m/s en la determinación de la velocidad ¡100.000 m/s! No tiene ningún sentido decir que la velocidad del electrón es la que se midiera $\pm 10000 \text{ m/s}$.

Para la energía y el tiempo, la relación de incertidumbre es la misma:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Es decir, que según el principio de Heisenberg, la idea clásica de considerar a los electrones como partículas moviéndose en órbitas determinadas con una cierta velocidad carece de sentido, ya que si determinamos una magnitud con cierta precisión, la otra se convierte en totalmente imprecisa y no tiene sentido físico hablar de algo no determinable.

Resumiendo, podemos señalar que aunque el principio de incertidumbre se cumple para todos los cuerpos, debido a que h es muy pequeña, solo constituye una limitación severa cuando estudiamos partículas subatómicas.

⁷ Ya habéis estudiado en química el tratamiento que la mecánica cuántica hace del átomo de hidrógeno y como se deja de hablar de **órbitas**, trayectorias perfectamente definidas, concepto aparejado al modelo clásico-cuántico de Bohr, y se empieza a hablar de **orbitales**, regiones del espacio donde la probabilidad de encontrar al electrón es muy alta. De hecho, el carácter no determinista de la nueva ciencia llevó a científicos tan prestigiosos como Einstein a no aceptar nunca dicha teoría. Según el propio Einstein, "Dios no juega a los dados", en clara alusión al carácter probabilístico de la nueva ciencia.