

TEMA 7. Física Cuántica

- 1 Naturaleza de la luz: Teorías clásicas.
- 2 Radiación térmica.
- 3 Efecto fotoeléctrico.
- 4 Espectros atómicos.
- 5 Dualidad onda-corpúsculo: hipótesis de De Broglie
- 6 Principio de indeterminación de Heisenberg: límites de validez de la física clásica.

1. Naturaleza de la luz: Teoría clásica

A lo largo de la Historia las ideas sobre la naturaleza de la luz y de las distintas radiaciones han ido cambiando. En la antigüedad (Grecia), apenas se describen fenómenos, dando explicaciones a veces místicas, nada científicas. Los árabes, sobre el s. XI, describen los fenómenos de reflexión y refracción, pero poco más.

Hay que esperar hasta finales del S. XVII para encontrar teorías científicas. **Huygens**, en 1690, y **Newton**, en 1704, exponen teorías contrapuestas:

Huygens: La luz se propaga como una onda mecánica (**teoría ondulatoria**), a través de un medio ideal, el éter. Supone que la luz debe experimentar fenómenos de interferencia y difracción, característicos de las ondas. Su velocidad será menor en medios más densos.

Newton: La luz está formada por partículas materiales (**teoría corpuscular**). No debe producir interferencia ni difracción. Su velocidad será mayor en medios más densos.

Por razones de prestigio científico, prevaleció la teoría de Newton, dejando olvidada la de Huygens. Hasta que **Young**, en 1801, observó la difracción de la luz; y **Foucault**, en 1855, comprobó que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire. Se rescató entonces la teoría ondulatoria como válida.

En 1865, **Maxwell**, como consecuencia de su teoría electromagnética, llegó a la conclusión de que la propagación de los campos \vec{E} y \vec{B} como onda electromagnética tenía las mismas características que la luz (hasta su velocidad). Por lo tanto, la luz fue considerada como una **onda electromagnética transversal**, que no necesitaba ningún medio material para propagarse.

A finales del S. XIX, parecía que los conceptos fundamentales en Física estaban perfectamente determinados. La teoría electromagnética de Maxwell daba cuenta de las interacciones eléctrica y magnética, dando a la luz (a la radiación, en general) un carácter claramente ondulatorio. Sin embargo, existían algunos fenómenos que no quedaban explicados mediante las llamadas "teorías clásicas". Fenómenos que iban a cambiar las bases del conocimiento científico. Vamos a estudiar tres de ellos: la **radiación térmica**, el **efecto fotoeléctrico** y los **espectros atómicos**.

Diferencias entre ondas y partículas:

Recordemos brevemente estas diferencias, ya tratadas en el Tema 5.

- Transporte de materia: Las partículas transportan materia.
Las ondas no transportan materia, las partículas del medio sólo vibran alrededor de su posición de equilibrio, quedando al final en la misma posición que al principio.
- Localización: Una partícula está localizada en el espacio, ocupa un lugar concreto en un determinado instante.
Una onda está deslocalizada. La onda afecta a múltiples puntos del espacio al mismo tiempo.
- Transmisión de energía: Las partículas transmiten la energía de forma discreta (discontinua).
Las ondas transmiten la energía de forma continua.
- Las ondas sufren interferencias y difracción, mientras que las partículas no. Si observamos el típico *patrón de interferencia*, con zonas de amplitudes máxima y mínima intercaladas (luz y oscuridad para la luz), es que estamos ante una onda.

2. Radiación térmica.

Por radiación térmica se entiende la radiación electromagnética (luz, de cualquier frecuencia) que emite un cuerpo debido a su temperatura.

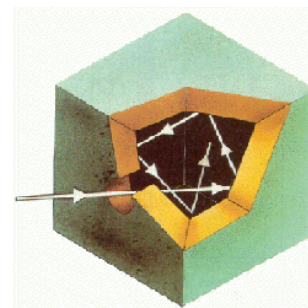
Cuando calentamos un cuerpo (un trozo de hierro, por ejemplo) observamos que, al aumentar considerablemente la temperatura, se pone "al rojo", es decir, emite luz de ese color. También el filamento de una bombilla se pone incandescente al calentarse. Y no sólo a altas temperaturas. A cualquier temperatura se emite radiación. El cuerpo humano emite radiación infrarroja (no visible) por el hecho de estar a 37 °C. Un hecho que se observa es que, a mayor temperatura, la frecuencia de la radiación emitida es mayor (y su λ es menor).



Para estudiar la radiación térmica se propone un modelo ideal llamado **cuerpo negro**. Un cuerpo negro sería aquel capaz de:

- Absorber toda la radiación que incide sobre él (es decir, no reflejaría nada de luz, por lo que se vería completamente negro).
- Emitir la mayor cantidad de radiación que pudiera emitir cualquier cuerpo a cualquier temperatura.

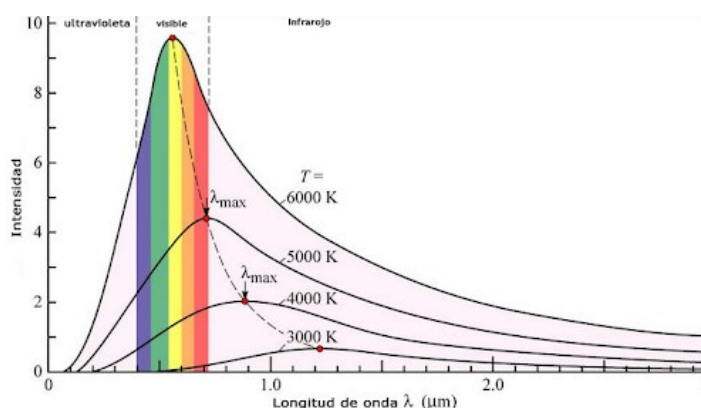
Aun siendo algo ideal, una buena aproximación de un cuerpo negro sería algo parecido a lo que indica la figura. Una cavidad de paredes absorbentes con un pequeño agujero al exterior. Prácticamente toda radiación que entre por el agujero quedará dentro; después de varias reflexiones quedará absorbida. También, si calentamos la cavidad, emitirá radiación.



Representando la energía emitida en función de la temperatura a la que está el cuerpo y de la λ de la radiación emitida, se llega a unas gráficas como la de la figura. Se observa que, a cada temperatura, el máximo de energía se emite en una frecuencia (o longitud de onda) diferente.

Ley de Wien: *A mayor temperatura, la λ correspondiente al máximo de emisión es menor.*

$$\lambda_{max} = \frac{cte}{T} \quad (cte = 2,8976 \text{ K}\cdot\text{m})$$



Hubo varios intentos de explicar la forma de estas gráficas. Tanto **Wien** como **Rayleigh y Jeans** consiguieron explicar partes, (λ muy grandes, radiaciones de poca energía). Pero a partir de la radiación ultravioleta no encajaba con ninguna teoría clásica. Es lo que se dio en llamar "catástrofe ultravioleta". Habría que cambiar la teoría, los conceptos sobre la naturaleza, para poder explicar este fenómeno.

Explicación de la radiación térmica (Max Planck, 1900): Cuantización de la emisión y absorción de la radiación.

La teoría clásica, que consideraba que la radiación tenía carácter ondulatorio, suponía que la energía se emitía de forma continua, como corresponde a una onda. Sin embargo, hemos visto que esto no explicaba la radiación térmica.



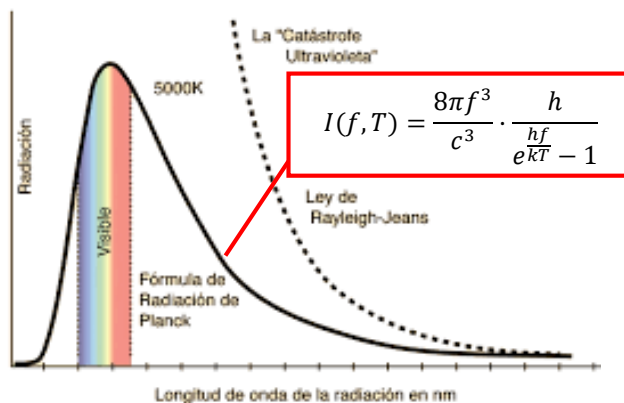
Max Planck supone algo completamente diferente. Propone:

- La energía no se emite de forma continua, sino discreta, es decir, "concentrada" en **cuantos** o paquetes de energía (algo muy similar a lo que ocurriría si se emitieran partículas, aunque Planck no llegue a dar ese paso).
- La energía correspondiente a un cuanto depende de la frecuencia de vibración de los átomos del material.

Viene dada por la expresión $E = h \cdot f$ ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ constante de Planck)

- Por lo tanto, la energía emitida no puede tener cualquier valor. Sólo podrá emitirse un número entero de cuantos de energía. $E_T = n \cdot h \cdot f$. Se dice entonces que **la energía emitida está cuantizada**.

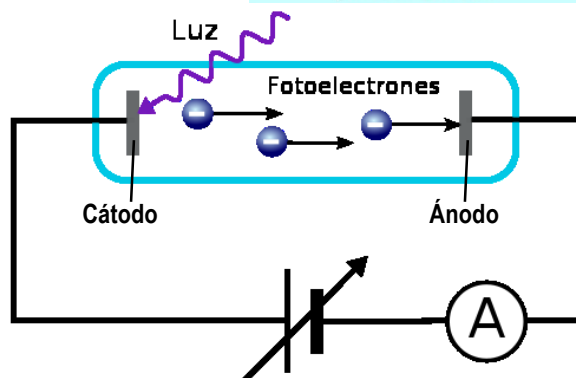
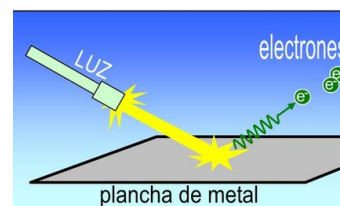
Teniendo en cuenta estas suposiciones, Planck obtiene la explicación teórica de toda la gráfica completa. Hubo que admitir, por lo tanto, que la emisión (y también la absorción, es decir, los intercambios de energía) de radiación no es continua, sino que está cuantizada.



3. Efecto fotoeléctrico.

Este fenómeno consiste en la emisión de electrones por parte de un metal cuando sobre él incide radiación electromagnética. Dichos electrones reciben el nombre de fotoelectrones. Fue descubierto por Hertz en 1887, haciendo incidir radiación UVA sobre Zinc. Actualmente, muchos sensores de luz, alarmas, o sistemas de apertura automática de puertas se basan en *células fotoeléctricas*.

Philip Lenard estudió experimentalmente este fenómeno, con un montaje como el de la figura. En un tubo de vacío tenemos una placa metálica (cátodo) sobre la que hacemos incidir luz de una frecuencia determinada. Los electrones emitidos por el cátodo llegan al ánodo y se incorporan a un circuito eléctrico, donde podemos medir la intensidad de corriente (y con esto, el número de electrones emitidos). Con una diferencia de potencial variable, podemos acelerar los electrones emitidos o frenarlos, haciendo que no lleguen al ánodo (y de este modo podemos medir su energía cinética).



• Según la **teoría clásica**, que supone que la luz es una onda, los electrones van absorbiendo poco a poco la energía de la onda electromagnética incidente, hasta que tienen suficiente energía para vencer la atracción del núcleo y saltar hasta el ánodo. Es decir, se esperaba que:

- La emisión de los electrones no sea instantánea
- Dicha emisión debe darse para cualquier frecuencia de la onda incidente.
- La energía cinética de los fotoelectrones debe depender únicamente de la cantidad de radiación, de su intensidad, no de la frecuencia.
- El número de electrones emitidos debe depender de la intensidad de la luz.

• Sin embargo, lo que se **observa realmente** en el experimento es:

- La emisión de los electrones es instantánea
- Empleando radiación con una frecuencia inferior a una cierta frecuencia (llamada frecuencia umbral, ν_0), no se observa emisión de electrones (no se mide corriente)
 - La frecuencia umbral depende únicamente del tipo de metal que utilizemos.
 - La energía cinética de los electrones depende de la frecuencia de la radiación, no de su intensidad (de la cantidad de luz).
 - La intensidad de corriente (nº de electrones emitidos) sí depende de la intensidad de la radiación. Es la única coincidencia con la explicación clásica.

Estos hechos, claramente en desacuerdo con la teoría clásica, hacen que tengamos que plantearnos seriamente el carácter ondulatorio de la radiación electromagnética, de la luz. En este experimento, se comporta más como una partícula que como una onda.

Explicación del efecto fotoeléctrico (Albert Einstein, 1905): Fotones, la luz se comporta como una partícula.



Einstein, en 1905, aplicó las hipótesis de Planck para explicar este fenómeno. Pero llegó aún más allá en su ruptura con las teorías clásicas. Supuso que no sólo los intercambios de energía están cuantizados, sino que *la propia radiación está constituida por "partículas", llamadas fotones, que transportan la energía de forma discreta, concentrada en cuantos de energía.* Es decir, supuso un comportamiento corpuscular para la luz, al menos en este fenómeno.

La energía de un fotón viene dada por la expresión de Planck $E_{\text{fotón}} = h \cdot f$

Suponiendo que la luz se comporta como una partícula, al chocar ésta con un electrón, le transmite instantáneamente toda su energía. Evidentemente, esta energía que cede al electrón dependerá de la frecuencia de la radiación.

Así, la energía de un fotón se emplea, en primer lugar, en arrancar al electrón del metal. Esta energía necesaria, que depende del tipo de metal, se denomina **trabajo de extracción** o **función trabajo** (W_{extr} , o Φ_0). También puede definirse como la energía mínima que debe tener el fotón para extraer un electrón del metal. Así, tendremos que $W_{\text{extr}} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la **frecuencia umbral** característica del metal.

(También se define la **longitud de onda umbral** $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$. Sería la longitud de onda máxima).

- Si la energía del fotón es menor que el W_{extr} , el electrón no saltará y el fotón será emitido nuevamente. No se producirá el efecto fotoeléctrico.

- Si la energía del fotón es mayor que W_{extr} , la energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$$E_{\text{fotón}} = W_{\text{extr}} + E_{c_e} \rightarrow h \cdot f = h \cdot f_0 + E_{c_e}$$

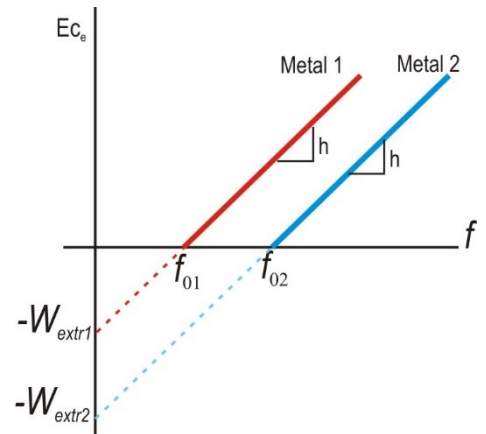
Con lo que la E_c máxima de los electrones $E_{c_e} = h \cdot f - h \cdot f_0$

La gráfica de la figura se corresponde con esta última fórmula. A partir de la frecuencia umbral, la energía cinética máxima de los electrones varía linealmente con la frecuencia (*una función del tipo $y = a \cdot x + b$*)

La pendiente de las rectas obtenidas (una distinta para cada metal) es igual a la constante de Planck.

La ordenada en el origen (en valor absoluto) nos indica el valor del trabajo de extracción del metal.

(Las líneas discontinuas que aparecen en la gráfica NO son datos experimentales. Recuerda que por debajo de f_0 no se produce emisión de electrones (no pueden tener E_c negativa))

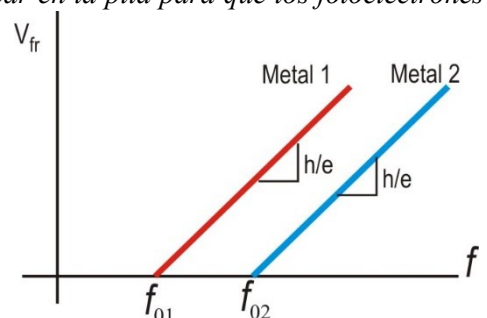


Potencial de frenado (V_{fr}):

La E_c y, por tanto, la velocidad de los electrones, se calcula experimentalmente frenando a los electrones mediante un campo eléctrico, hasta que pierdan toda su energía cinética. La diferencia de potencial necesaria se denomina **potencial de frenado** (*diferencia de potencial mínima que hay que colocar en la pila para que los fotoelectrones que saltan queden frenados y no lleguen al otro extremo del tubo*).

Según esto $\Delta E_c = -\Delta E_p \rightarrow 0 - E_{c_e} = -e \cdot V_{fr} \rightarrow V_{fr} = \frac{E_{c_e}}{e}$

La gráfica correspondiente al potencial de frenado sería la misma que la de la energía cinética. La pendiente de las rectas sería ahora $\frac{h}{e}$



Con esto se explica fácilmente lo observado:

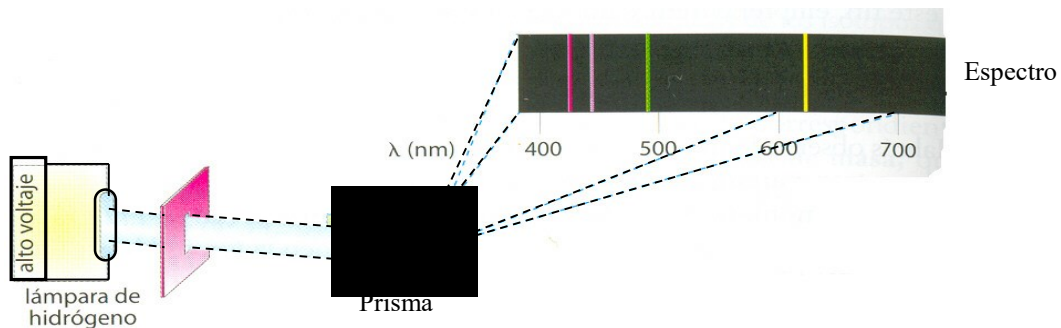
- La emisión de electrones es instantánea, ya que el fotón, al chocar, cede instantáneamente su energía.
- Existe una frecuencia umbral por debajo de la cual no hay emisión de electrones. Con una frecuencia inferior, la energía del fotón será menor que el trabajo de extracción, y el electrón no saltará.
- La frecuencia umbral depende únicamente del material, ya que la función trabajo es algo característico de cada metal
- La energía cinética de los electrones depende de la frecuencia de la radiación. Basta con mirar la expresión.
- El número de electrones emitidos (la intensidad de corriente) depende de la intensidad de la radiación, es decir, del número de fotones que choquen. A mayor nº de fotones, mayor nº de electrones podrá saltar.

Por lo tanto, hemos llegado a la conclusión de que, en ciertos fenómenos, la luz se comporta como una partícula. No quiere decir esto que siempre se comporte como una partícula. En la difracción se comporta como una onda. Se dice que la luz tiene un comportamiento **dual**. Tendremos que plantearnos entonces si la distinción tan clara que conocemos entre onda y partícula sigue siendo igual de clara cuando nos introducimos en el mundo microscópico (subatómico).

4. Espectros atómicos.

Ya hemos visto el fenómeno de la radiación térmica y los problemas que acarrea a la teoría clásica. Pero aún existía un hecho más, relacionado con la radiación térmica, que no estaba explicado: los espectros atómicos.

Al calentar un cuerpo emite radiación (luz). Pero esta radiación está formada por ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Con algún aparato apropiado (un prisma, para la luz visible), podremos separar las diferentes frecuencias y obtener una imagen en una pantalla o película fotográfica. Esta imagen obtenida es lo que se conoce como **espectro de emisión**.



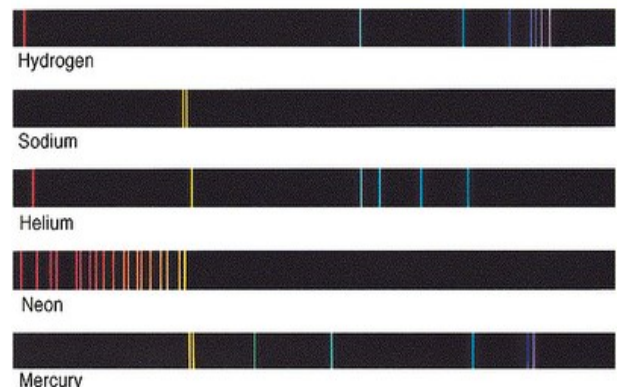
Del mismo modo, podemos entender el **espectro de absorción**. Ahora no calentamos la sustancia, sino que hacemos incidir radiación sobre ella (en estado gaseoso). La sustancia absorberá ciertos tipos de luz (ciertas frecuencias), que aparecerán como zonas negras en la imagen del espectro.

Según la Teoría clásica: Se espera que los espectros de emisión y de absorción sean **continuos**. Es decir, que se emitan todas las frecuencias (una gradación continua de "colores", sin interrupciones)

Lo observado experimentalmente es:

En 1859, Bunsen y Kirchhoff estudian espectros de emisión de diferentes sustancias al ser calentadas. Descubren que:

- Los espectros observados son **discontinuos**. Sólo se observan ciertas líneas (ciertas frecuencias emitidas).
- Cada elemento químico tiene su propio espectro característico (esto permitirá identificar los componentes de una sustancia a partir de la luz que emite).



Ley de Balmer (1885):

Johann Balmer, estudiando el espectro de emisión del hidrógeno, llega a una ley *empírica* que relaciona algunas energías de las radiaciones emitidas. $E = R_E \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$; donde $R_E = 2,172 \cdot 10^{-18} \text{ J}$, (cte. de Rydberg) y $n = 3,4,5,6,7$.

Posteriormente otros científicos (Lyman, Braquett, Paschen, Pfund), descubren otras leyes para otros grupos de líneas. En general, se pudo llegar a una ley empírica para todos los grupos: $E = R_E \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$, donde n_1 y n_2 son números naturales, y $n_2 > n_1$.

La teoría clásica sobre la luz era incapaz de explicar la discontinuidad de los espectros y las leyes empíricas obtenidas.

Explicación de los espectros atómicos (Niels Böhr, 1913): Cuantización de las órbitas atómicas.



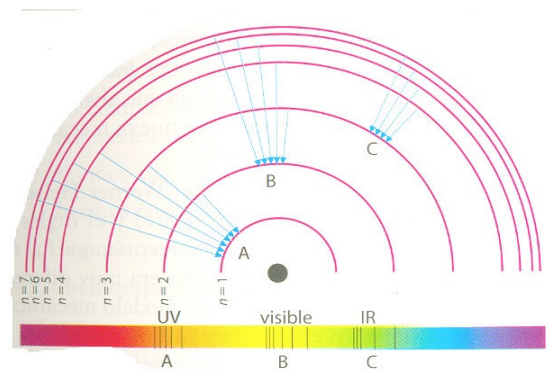
Sabemos que la radiación emitida por una sustancia es originada por oscilaciones (saltos) de los electrones de sus átomos. Según los modelos clásicos para el átomo (Rutherford), los electrones pueden ocupar cualquier órbita dentro del átomo y, por lo tanto, dar cualquier salto y emitir radiación de cualquier frecuencia. Eso daría lugar a un espectro continuo.

Böhr introduce unos postulados en el modelo. Según él:

- La órbita del electrón no puede estar a cualquier distancia del núcleo. Sólo son permitidas ciertas órbitas, en las que el momento angular ($L_O = r \cdot m \cdot v$) es múltiplo de la cantidad $\frac{h}{2\pi}$. (cuantización de las órbitas)
- Mientras el electrón permanece en una órbita, dada por el nº cuántico n, su energía permanece constante.

$$E = -\frac{R_E}{n^2} \quad R_E = \frac{2\pi^2 K^2 e^4 m}{h^2} = 2,172 \cdot 10^{-18} \text{ J} \quad (-13,6 \text{ eV})$$

- El átomo emite radiación (un fotón) cuando un electrón salta de una órbita de mayor energía (más lejana) a otra de menor energía (más cercana). La energía del fotón emitido y la frecuencia están relacionadas por la expresión de Planck $E = h \cdot v$
- Cuando el átomo absorbe radiación, la energía de dicha radiación se emplea en el salto de un electrón hacia una órbita más alejada.
- La energía del fotón emitido o absorbido es igual a la diferencia de energía de los niveles inicial (n_1) y final (n_2).



$$E_{\text{fotón}} = |\Delta E| = R_E \cdot \left| \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right| \quad \text{Que es la fórmula de Balmer.}$$

Con esto se explica la discontinuidad de los espectros. Como sólo están permitidas ciertas órbitas, sólo estarán permitidos ciertos saltos, y por lo tanto, sólo se emitirá radiación de ciertas frecuencias muy concretas. Lo mismo ocurre con la absorción.

Aplicando esto al cálculo de la energía emitida o absorbida, y de la longitud de onda de la radiación correspondiente, Böhr obtuvo teóricamente la ley experimental de Balmer, con lo que explicaba los espectros.

5. Dualidad onda-partícula: Hipótesis de De Broglie



Una vez que hemos visto el comportamiento dual de la luz, que antes considerábamos únicamente como onda, cabe plantearnos si ese comportamiento dual es exclusivo de la luz. ¿Podría darse lo contrario? ¿Puede que algo que consideramos una partícula (en electrón, p.ej.) se comporte como una onda en algunos experimentos?

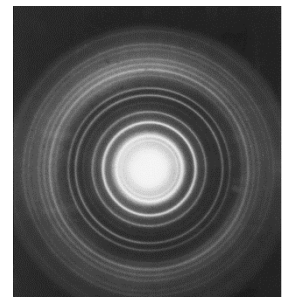
El científico francés **Louis de Broglie**, basándose en los resultados de Planck, Einstein y otros (Compton), supuso en 1924 que *cualquier partícula puede comportarse como una onda en determinados experimentos. A cada partícula corresponde una onda asociada*. Es decir, supuso que toda la materia tiene un comportamiento dual.

Dicho comportamiento ondulatorio vendrá caracterizado por una λ , llamada **longitud de onda asociada** a la partícula que estemos considerando. Esta λ viene dada por la expresión $\lambda = \frac{h}{p}$, donde h es la constante de Planck

y $p = m \cdot v$ es la cantidad de movimiento de la partícula. Así $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

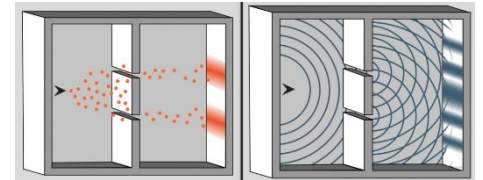
La onda asociada a una partícula recibe el nombre de **onda de materia**.

Ahora bien, si toda partícula puede comportarse como una onda, tal como supuso de Broglie, dicho comportamiento debe ser observable. Es decir, un haz de electrones debería de producir difracción al encontrarse con un obstáculo del tamaño adecuado. Empleando valores característicos ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, $v = 5 \cdot 10^6$ m/s) obtenemos $\lambda = 1,45 \cdot 10^{-10}$ m, es decir, aproximadamente la distancia entre átomos en algunos metales. En 1927, **Davidson y Germer**, usando una lámina de Níquel como red de difracción, comprobaron que las suposiciones de De Broglie eran ciertas.

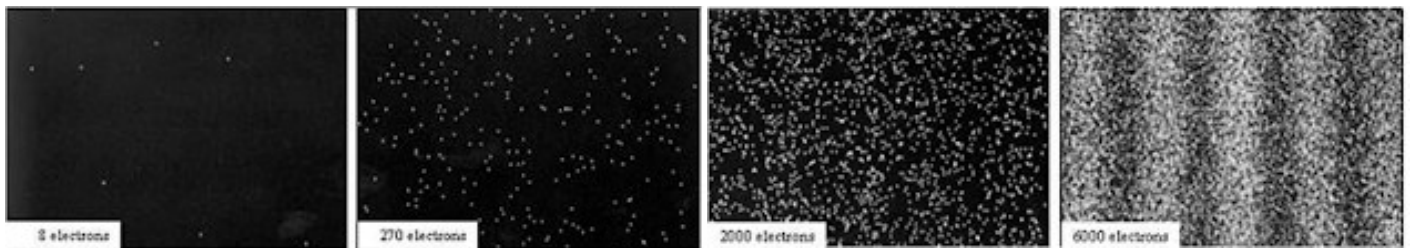


Difracción de electrones

Más sorprendente es el experimento de la doble rendija: lanzamos electrones contra una lámina con dos rendijas, separadas una distancia similar a la longitud de onda asociada a los e^- . Tras pasar por una u otra rendija, los electrones inciden sobre una pantalla, donde podemos fotografiar los destellos que producen.



- Si los electrones se comportaran como partículas, chocarían con la lámina, o pasarán por una o por otra rendija, y deberíamos observar lo que aparece en el primer dibujo (rojo): dos “manchas” de electrones en la pantalla.
- Sin embargo, al hacer la experiencia, lo que se observa en la pantalla es un patrón de interferencia (azul) característico de las ondas, incluso si se lanzan los electrones individualmente, de uno en uno, como se observa en la secuencia de fotos de abajo. La única explicación a esto es que el electrón se comporta como una onda, deja de estar localizado, y *pasa por las dos rendijas al mismo tiempo*, para interferir consigo mismo en la pantalla.



¿Se comporta también como una onda una partícula macroscópica, como una bala o un balón de fútbol? ¿Producirá interferencias y difracción? Teóricamente sí, pero en la práctica, recordemos que para que sea observable, debe encontrarse un obstáculo de tamaño similar. Para una partícula macroscópica (p.ej. $m = 1$ kg, $v = 10$ m/s) obtenemos una longitud de onda asociada $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-35}$ m. No existen en el universo obstáculos de tamaño tan pequeño. O sea, no podremos apreciar el carácter ondulatorio de una partícula macroscópica.

Una consecuencia importante de la hipótesis de De Broglie es que explica la cuantización de las órbitas de los electrones en el átomo, considerando que dichas órbitas son **ondas estacionarias** para el electrón. La longitud de la órbita cumple que es un n° entero de veces la λ asociada.

¿Cómo calculamos la velocidad de la partícula?

Normalmente a partir de su energía cinética $E_c = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}}$

En el caso de partículas cargadas, esta E_c la adquieren al acelerarlas desde el reposo mediante una diferencia de potencial ΔV . (como vimos en el tema de Campo Eléctrico)

$$E_M = cte \rightarrow \Delta E_c = - \Delta E_{p_e} \rightarrow \Delta E_c = - q \cdot \Delta V \rightarrow E_c - 0 = - q \cdot (V_2 - V_1) \rightarrow E_c = |q \cdot \Delta V|$$

Recuerda que si $q > 0 \rightarrow V_1 > V_2$, y si $q < 0 \rightarrow V_2 > V_1$.

6. Principio de incertidumbre de Heisenberg. Límites de validez de la física clásica. Hacia una nueva Física.



Werner Heisenberg, en 1927, teniendo en cuenta el carácter dual de la materia, descubrió que era imposible medir simultáneamente y con exactitud algunas magnitudes de un sistema. De hecho, el propio hecho de medir ya modifica el sistema que estamos midiendo.

Supongamos el siguiente experimento (totalmente imaginario), llamado *microscopio de Bohr*: Queremos medir a la vez la posición y la velocidad de un electrón. Para poder ver al electrón con un microscopio, al menos tendría que chocar con él un fotón de luz que, al rebotar, llegara hasta el microscopio. Ahora bien, al chocar, el fotón cambiará la velocidad del electrón, y no podremos medir la que tenía anteriormente.

Una forma de expresar este principio de incertidumbre es la siguiente:

Es imposible medir simultáneamente y con total exactitud la posición y la cantidad de movimiento (velocidad) de una partícula. Siempre la incertidumbre (error que podemos cometer) en la medida cumplirá

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4 \cdot \pi}$$

donde Δx y Δp son las incertidumbres al medir la posición y la cantidad de movimiento. Se observa que si Δx se hace muy pequeña (gran exactitud), Δp se hará muy grande (mucho error).

De este principio de incertidumbre pueden extraerse algunas **consecuencias** fundamentales.

Las relaciones de incertidumbre no sólo se refieren a la posición y la cantidad de movimiento. También la energía y el tiempo cumplen una relación parecida: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$. Esta relación se cumple en las transiciones de electrones dentro del átomo, o en la generación de partículas "virtuales".

- Este principio limita en gran medida el conocimiento que podemos tener sobre la naturaleza. De hecho, **rompe con el determinismo** propio de los científicos del s. XIX, que suponían que todo en la naturaleza podía ser conocido con exactitud. La incertidumbre no se produce como consecuencia de una medida imperfecta, sino que es algo inherente al propio sistema, a su carácter dual onda-partícula.

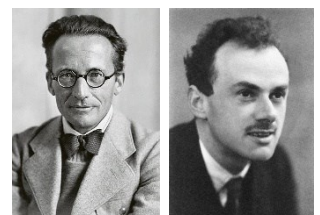
- Ya no podemos hablar de posición o velocidad exactas de una partícula, únicamente de **probabilidad** de encontrar a una partícula en una determinada posición. Por lo tanto, *el modelo de Bohr para el átomo ya no es válido*, hay que buscar una nueva visión de las cosas, una nueva Física.

Entre los años 20 y 30 del s.XX se desarrollan tres enfoques distintos para explicar los fenómenos cuánticos, fundamentalmente la estructura atómica y la interacción radiación-materia.

- **Heisenberg** desarrolla la *mecánica matricial*, donde propone usar sólo magnitudes medibles directamente, y establece las relaciones de incertidumbre

- **Erwin Schrödinger** idea la *mecánica ondulatoria*, proponiendo que toda la materia se reduce a ondas, y que cada sistema tiene una función de onda que determina su comportamiento y evolución.

- **Paul Dirac** crea el *álgebra cuántica*, una herramienta fundamental para el tratamiento matemático de los fenómenos cuánticos.



Los trabajos de estos, junto a Böhr, Pauli, Born... llevaron a una síntesis conocida como la *interpretación de Copenhage* de la Física Cuántica. Esta interpretación se sustenta en:

- La dualidad onda-partícula de toda la materia y la radiación.
- El principio de incertidumbre.
- La probabilidad. No existe un resultado exacto en una experiencia, sólo podemos conocer la probabilidad de que se produzca uno u otro resultado en la medida, o de que se genera una partícula u otra. La función de onda del sistema nos dice precisamente eso, la probabilidad de que suceda uno u otro fenómeno. Recordemos los orbitales atómicos, que son las posibles funciones de onda para el electrón en el átomo, e indican la probabilidad de encontrarlo en una determinada zona del espacio.
- La superposición de estados: Mientras no realicemos la medida, el sistema está en una superposición de todos sus estados posibles. Al medir, la función de onda “colapsa”, y el sistema se decanta por una de sus posibles soluciones. Es el caso del famoso “gato de Schrödinger”, un experimento ideal, en el que un gato está en una caja, y su vida depende de que un frasco de veneno se rompa si un núcleo radiactivo se desintegra. Como la radiactividad es un proceso cuántico, el sistema se encontraría en todos los estados posibles hasta que abramos la caja y midamos: es decir, el gato está vivo y muerto al mismo tiempo.



A pesar de su extrañas propuestas, tan alejadas de lo que vemos a nivel macroscópico, y de lo contrarios al sentido común que son a veces sus planteamientos, el desarrollo de la Física Cuántica en lo que se conoce como Física de Partículas (Electrodinámica Cuántica, Cromodinámica Cuántica) ha conseguido explicar el mundo microscópico, haciendo predicciones que se han cumplido con una precisión increíble. Y no sólo el mundo subatómico, la Cuántica es necesaria para explicar la evolución de las estrellas, o cómo se formó el Universo.

Como anécdota, podemos recordar que Einstein, uno de los “padres” de esta teoría, nunca creyó en ella, considerándola una aproximación de otra teoría más fundamental, y que sí produciría resultado exactos, sin tener que recurrir a la probabilidad. Son ya legendarias sus discusiones (serenas, pero implacables) con Böhr, y su frase “*Dios no juega a los dados con el Universo*”. Menos conocida es la respuesta de Böhr: “*Einstein, no le diga a Dios lo que tiene que hacer con los dados*”. Stephen Hawking aportó en época más reciente otra versión: “*Dios no sólo juega a los dados con el Universo, a veces los tira donde no podemos verlos*”.

Validez de la Física Clásica:

La Física Cuántica, en principio, sería aplicable en todas las situaciones. Ahora bien, su empleo es tremendamente complicado, dado el gran número de partículas (e^- , p , n ...) que intervienen en el problema más simple. Sin embargo, podemos usar la Física Clásica en aquellos casos en los que **no sea apreciable el carácter ondulatorio de la materia**. Se considera esto cuando la λ asociada es despreciable frente al tamaño del sistema estudiado.

Como consecuencia, la Física Clásica será perfectamente aplicable a situaciones macroscópicas, mientras que la Física Cuántica debe ser forzosamente aplicada en el mundo microscópico (moléculas, átomos ...).

TABLA COMPARATIVA ONDAS – PARTÍCULAS

	Características de partícula		Caract. comunes onda-partícula	Caract. de onda
	Masa	Cantidad de movimiento	Energía	Longitud de onda
Fotón	0	$p = \frac{E}{c}$	$E = h \cdot f$	$\lambda = \frac{c}{f}$
Partículas clásicas (protón, electrón, etc)	m	$p = m \cdot v$	$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$	$\lambda = \frac{h}{p}$

Problemas del Tema 7

Fotones:

1.- Determinar la energía de un fotón para:

- a) Ondas de radio de 1500 kHz b) Luz verde de 550 nm
c) Rayos X de 0,06 nm

(para todas, el medio de propagación es el vacío) $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

(a) $9,95 \cdot 10^{-28} \text{ J}$; b) $3,61 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; c) $3,32 \cdot 10^{-15} \text{ J}$)

2.- Una estación de radio emite con una $\lambda = 25 \text{ m}$. Calcular:

- a) Frecuencia de las OEM emitidas ($1,2 \cdot 10^7 \text{ Hz} = 12 \text{ MHz}$)
b) Energía de los fotones ($7,96 \cdot 10^{-27} \text{ J}$)
c) Número de fotones emitidos por hora si la potencia de la emisora es de 6 kW. ($2,71 \cdot 10^{33} \text{ fotones/h}$)
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Efecto fotoeléctrico:

3.- Un haz de luz de 400 nm incide sobre un fotocátodo de Ce, cuyo trabajo de extracción es de 1,8 eV. Calcular:

- a) Energía máxima de los fotoelectrones. ($2,09 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)
b) Frecuencia umbral y longitud de onda umbral. ($4,34 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, $6,91 \cdot 10^{-7} \text{ m}$)
c) Explique cómo varían los resultados anteriores si ahora la radiación es de 800 nm.
(Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

4.- Una radiación de $1,5 \mu\text{m}$ incide sobre una superficie metálica y produce la emisión de fotoelectrones con una velocidad máxima $v = 10^5 \text{ m s}^{-1}$. Calcular:

- a) Trabajo de extracción del metal ($1,28 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)
b) frecuencia umbral de fotoemisión ($1,93 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$)
c) Potencial de frenado de los electrones ($0,028 \text{ V}$)
(datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$)

5. Al iluminar una superficie metálica con una longitud de onda $\lambda_1 = 200 \text{ nm}$, el potencial de frenado de los fotoelectrones es de 2 V, mientras que si la longitud de onda es $\lambda_2 = 240 \text{ nm}$, el potencial de frenado se reduce a 1 V. Obtener razonadamente el trabajo de extracción del metal y el valor que resulta para la cte de Planck, h, en esta experiencia.

($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) ($W_{\text{extr}}: 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $h = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

Dualidad onda-partícula:

- 6.- Calcular la λ asociada a:
- a) Un electrón acelerado por una $\Delta V = 100 \text{ V}$. ($1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$)
b) Un electrón de $E_c = 1 \text{ eV}$ ($1,23 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)
c) Una bala de 10 g que se mueve a 500 m s^{-1} . ($1,32 \cdot 10^{-34} \text{ m}$ (insignificante))
d) un automóvil de 1000 kg con $v = 100 \text{ m/s}$. ($6,62 \cdot 10^{-39} \text{ m}$ (insignificante))
(datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$)

Principio de incertidumbre:

7.- Calcular la incertidumbre en la determinación de la posición en los siguientes casos:

- a) Electrón cuya velocidad, de 7000 km/s, se ha medido con una incertidumbre del 0,003%
b) Partícula de 50 g que se desplaza a una velocidad de 300 m/s, medida con la misma incertidumbre que el caso anterior. ($a) 2,76 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $b) 1,17 \cdot 10^{-31} \text{ m}$ (despreciable))
(datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$)

Cuestiones aparecidas en las Pruebas de Acceso a la Universidad.

2025. Junio. D

a) El potencial de frenado de los electrones en una célula fotoeléctrica es V_f . Deduzca y justifique: i) (0,5 puntos) la velocidad máxima de los electrones emitidos; ii) (0,5 puntos) la relación entre las velocidades máximas si el potencial de frenado se reduce a la mitad.

b2) Un protón y un electrón tienen la misma energía cinética de $7,2 \cdot 10^{-16}$ J. Calcule razonadamente: i) (0,75 puntos) la longitud de onda de De Broglie de cada una de ellas; ii) (0,75 puntos) la diferencia de potencial necesaria para detener cada una de ellas, justificando si el potencial debe aumentar o disminuir en cada caso.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

2025. Julio. D

a) Un mesón π tiene una masa 274 veces mayor que la de un electrón. Si ambas partículas tienen la misma longitud de onda de De Broglie, determine: i) (0,5 puntos) la relación entre sus velocidades; ii) (0,5 puntos) la relación entre sus energías cinéticas.

2024. Junio. D2

a) Dos partículas tienen la misma energía cinética. Deduzca de manera razonada la relación entre sus longitudes de onda de De Broglie si la masa de la primera es un tercio de la masa de la segunda.

b) Un protón se mueve con una velocidad de $3,8 \cdot 10^3$ m s⁻¹. Determine razonadamente: i) la longitud de onda de De Broglie asociada de dicho protón. ii) la energía cinética de un electrón que tuviera igual momento lineal que el protón; iii) la velocidad del electrón.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}, m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

2023. Junio. D1

a) Considere un núcleo de ²⁸Si y otro de ⁵⁶Fe. La masa del núcleo de hierro es el doble que la del núcleo de silicio. Determine, de forma justificada, la relación entre sus longitudes de onda de De Broglie en las siguientes situaciones:

i) Si el momento lineal o cantidad de movimiento es el mismo para los dos; ii) si los dos núcleos se mueven con la misma energía cinética.

b) Los neutrones que se emiten en un proceso de fisión nuclear tienen una energía cinética de $1,6 \cdot 10^{-13}$ J. i) Determine razonadamente su longitud de onda de De Broglie y su velocidad. ii) Calcule la longitud de onda de De Broglie cuando la velocidad de los neutrones se reduce a la mitad. $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s; $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg

2022 Junio. D.1.

a) En el efecto fotoeléctrico, la luz incidente sobre una superficie metálica provoca la emisión de electrones de la superficie. Discuta la veracidad de las siguientes afirmaciones: i) Se desprenden electrones sólo si la longitud de onda de la radiación incidente es superior a un valor mínimo. ii) La energía cinética máxima de los electrones es independiente del tipo de metal. iii) La energía cinética máxima de los electrones es independiente de la intensidad de la luz incidente.

b) Los electrones emitidos por una superficie metálica tienen una energía cinética máxima de $4 \cdot 10^{-19}$ J para una radiación incidente de $3,5 \cdot 10^{-7}$ m de longitud de onda. Calcule: i) El trabajo de extracción de un electrón individual y de un mol de electrones, en julios. iii) La diferencia de potencial mínima para frenar los electrones emitidos.

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

2021 Junio. D.2.

a) Un protón y un electrón son acelerados por una misma diferencia de potencial en una cierta región del espacio. Indique de forma razonada, teniendo en cuenta que la masa del protón es mucho mayor que la del electrón, si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas: i) "El protón y el electrón poseen la misma longitud de onda de De Broglie asociada". ii) "Ambos se mueven con la misma velocidad".

b) Un electrón tiene una longitud de onda de De Broglie de $2,8 \cdot 10^{-10}$ m. Calcule razonadamente: i) La velocidad con la que se mueve el electrón. ii) La energía cinética que posee. $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s

2021. Julio. D.2.

a) Enuncie la hipótesis de De Broglie y escriba su ecuación. Indique las magnitudes físicas involucradas y sus unidades en el Sistema Internacional.

b) Una partícula alfa (α) emitida en el decaimiento radiactivo del ^{238}U posee una energía cinética de $6,72 \cdot 10^{-13}$ J. i) ¿Cuánto vale su longitud de onda de De Broglie asociada? ii) ¿Qué diferencia de potencial debería existir en una región del espacio para detener por completo la partícula alfa? Indique mediante un esquema la dirección y sentido del campo necesario para ello. Razone todas sus respuestas. $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s; $m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27}$ kg; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

2020. Julio. 4

a) Dos partículas de diferente masa tienen asociada una misma longitud de onda de De Broglie. Sabiendo que la energía cinética de una de ellas es el doble que la otra, determine la relación entre sus masas.

b) Se acelera un protón desde el reposo mediante una diferencia de potencial de 1000 V. Determine: i) La velocidad que adquiere el protón. ii) Su longitud de onda de De Broglie.

$$m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

2019. Junio. B.4

a) Sobre un metal se hace incidir una cierta radiación electromagnética produciéndose la emisión de electrones. i) Explique el balance energético que tiene lugar en el proceso. Justifique qué cambios se producirían si: ii) Se aumenta la frecuencia de la radiación incidente. iii) Se aumenta la intensidad de dicha radiación.

b) Se observa que al iluminar una lámina de silicio con luz de longitud de onda superior a $1,09 \cdot 10^{-6}$ m deja de producirse el efecto fotoeléctrico. Calcule razonadamente la frecuencia umbral del silicio, su trabajo de extracción y la energía cinética máxima de los electrones emitidos cuando se ilumina una lámina de silicio con luz ultravioleta de $2,5 \cdot 10^{-7}$ m.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

2019. Septiembre. B.4

a) Explique el proceso de conservación de la energía que tiene lugar en el efecto fotoeléctrico. Imagine que tenemos luz azul de baja intensidad y luz roja de alta intensidad. Ambas logran extraer electrones de un cierto metal ¿Cuál producirá electrones con mayor energía cinética? ¿En qué caso habrá más electrones emitidos? Razone sus respuestas.

b) La energía mínima necesaria para arrancar un electrón de una lámina de un metal es de $1,0 \cdot 10^{-18}$ J. Determine la frecuencia umbral de este metal y la longitud de onda correspondiente a la misma. Si se incide con una luz de longitud de onda $0,85 \cdot 10^{-7}$ m, ¿qué energía cinética máxima tendrán los electrones extraídos?

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

2019. Suplente Junio. A.4

a) Justifique la veracidad o falsedad de las siguientes afirmaciones: i) Un electrón en movimiento puede ser estudiado como una onda o como una partícula. ii) Si se duplica la velocidad de una partícula se duplica también su longitud de onda asociada. iii) Si se reduce a la mitad la energía cinética de una partícula se reduce a la mitad su longitud de onda asociada.

b) Determine la longitud de onda de un electrón que es acelerado desde el reposo aplicando una diferencia de potencial de 200 V.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

2019. suplente Septiembre. B.4

a) Responda razonadamente a las siguientes cuestiones: i) ¿Se podría determinar simultáneamente, con exactitud, la posición y la cantidad de movimiento de una partícula? ii) ¿Se tiene en cuenta el principio de incertidumbre en el estudio de los fenómenos ordinarios?

b) Al iluminar un metal con una radiación de frecuencia $7,89 \cdot 10^{14}$ Hz se produce una emisión de electrones que requiere aplicar una diferencia de potencial de 1,3 V para frenarlos. Calcule razonadamente el trabajo de extracción del metal y justifique si al iluminarlo con una radiación de frecuencia $4 \cdot 10^{14}$ Hz se producirá emisión de electrones.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

2019. Reserva A. B.4

a) Enuncie el principio de dualidad onda-corpúsculo y explique por qué no se considera dicha dualidad al estudiar los fenómenos macroscópicos.

b) Al incidir luz de longitud de onda $2,7625 \cdot 10^{-7}$ m sobre un material, los electrones emitidos con una energía cinética máxima pueden ser frenados hasta detenerse aplicando una diferencia de potencial de 2 V. Calcule el trabajo de extracción del material. Determine la longitud de onda de De Broglie de los electrones emitidos con energía cinética máxima.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

2019. Reserva B. B.4

a) Explique el significado de los términos frecuencia umbral, trabajo de extracción y la relación entre ellos. ¿Cómo cambiarían dichas magnitudes si disminuyera la longitud de onda de una radiación que al incidir sobre un metal produce emisión de electrones?

b) Una lámina de sodio metálico cuyo trabajo de extracción es de 2,3 eV, es iluminada por una radiación de longitud de onda $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. ¿Cuál será la velocidad de los electrones emitidos? ¿Cuál sería la velocidad de los electrones si se ilumina con una radiación de longitud de onda $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$?

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$