TEMA 7. NATURALEZA DE LA LUZ. DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA.

7.1 Naturaleza de la luz; teorías clásicas.
7.2 Dificultades de la teoría clásica; radiación térmica, efecto fotoeléctrico, espectros atómicos.
7.3 Cuantización de la energía; fotones
7.4 Dualidad onda-corpúsculo; hipótesis de De Broglie
7.5 Principio de indeterminación de Heisemberg; límites de validez de la física clásica.

7.1 NATURALEZA DE LA LUZ. TEORÍAS CLÁSICAS

A lo largo de la Historia las ideas sobre la naturaleza de la luz y de las distintas radiaciones ha 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 **E** y **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.

7.2 DIFICULTADES EN LA TEORÍA CLÁSICA: RADIACIÓN TÉRMICA, EFECTO FOTOELÉCTRICO Y ESPECTROS ATÓMICOS

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 dos de ellos: la **radiación térmica** y el **efecto fotoeléctrico**:

♦ Radiación térmica: (Radiación electromagnética 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 ºC. 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 incida 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.

Aún siendo algo ideal, una buena aproximación de un cuerpo negro sería algo parecido a lo que indica la figura 7.1. 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.

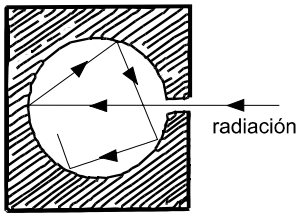


fig 7.1

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 una gráfica como la de la figura 7.2. Se observa que, a cada temperatura, el máximo de energía se emite en una frecuencia diferente.

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

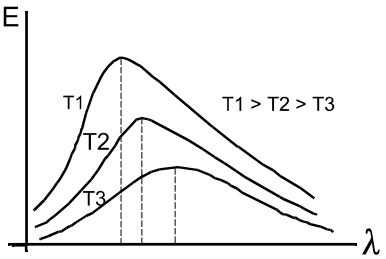


fig. 7.2

Hubo varios intentos de explicar la forma de estas gráficas. Tanto **Wien** como **Rayleigh-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.

♦ Efecto fotoeléctrico:

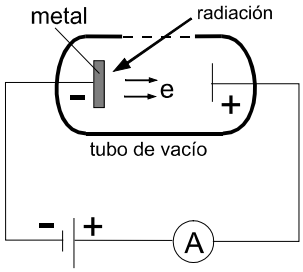


fig. 7.3

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.

Colocando un dispositivo como el de la figura 7.3, es posible que los electrones emitidos pasen a formar parte de un circuito eléctrico, pudiendo así medir la intensidad de corriente mediante un amperímetro.

• Según la **teoría clásica**, 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 esperaría 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.

• 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, υ_o), no se observa emisión de electrones (no se mide corriente)
- La frecuencia umbral depende únicamente del tipo de metal que utilicemos.
- 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) sí depende de la intensidad de la radiación.

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.

♦ Espectros atómicos:

Ya hemos visto el fenómeno de la radiación térmica y los problemas que acarreaba 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:

El concepto de espectro es introducido por Isaac Newton en su obra *Óptica* (1704) .

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).
- Cada elemento químico tiene su propio espectro característico (esto permitirá identificar los componentes de una sustancia a partir de la luz que emite).

En 1885, Balmer , estudiando el espectro de emisión del Hidrógeno, llega a una ley *empírica* que relaciona algunas longitudes de onda emitidas. $\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$; donde $R = 1{,}0973 \cdot 107\ m^{-1}$, (cte. de Rydberg)

y $n = 3, 4, 5, 6, 7$.

Posteriormente otros científicos (Lymann, Braquett, Paschen, Pfund), descubren otras leyes para otros grupos de líneas. En general, se pudo llegar a una ley empírica para todos los grupos: $\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{{n_1}^2} - \frac{1}{{n_2}^2} \right)$, 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.

7.3 CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA: FOTONES

Estos tres fenómenos vistos anteriormente fueron explicados, respectivamente, por **Max Planck** (1900), **Albert Einstein** (1905), y **Niels Böhr** (1913). Einstein recibiría el premio Nobel de Física por su explicación del efecto fotoeléctrico (curiosamente, nunca lo recibió por su más famosa teoría, la de la relatividad). Los conceptos introducidos por estos científicos, junto con otros, sentarían las bases de una nueva visión de la naturaleza: la **Teoría Cuántica**.

♦ Explicación de Planck de la radiación térmica:

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.

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).
- La energía correspondiente a un cuanto depende de la frecuencia de vibración de los átomos del material. Viene dada por la expresión $E = h \cdot \upsilon$ (h = 6,63 · 10^{-34} J ·s cte de Planck)

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

Teniendo en cuanta 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.

(Una unidad que usaremos para medir energías es el *electronvoltio* (eV). se define como la energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de un Voltio. (1 eV = 1,6 · 10^{-19} J)

♦ Explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

Einstein 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 $E_f = h \cdot \upsilon$

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_o). También puede definirse como la energía mínima que debe tener el fotón para extraer un electrón del metal. Así, tendremos que $W_{extr} = h \cdot \upsilon_0$, donde υ_0 es la frecuencia umbral característica del metal. (También existe la longitud de onda umbral $\lambda_0 = \frac{c}{\upsilon_0}$).

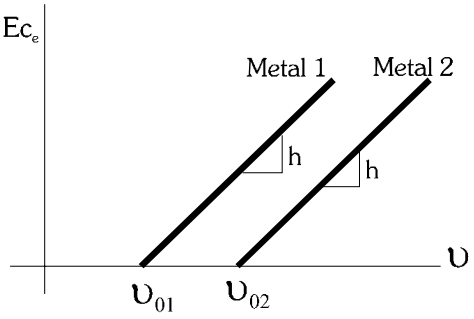
La energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$E_f = W_{extr} + Ec_e \quad \rightarrow \quad h \cdot \upsilon = h \cdot \upsilon_0 + \frac{1}{2} m \cdot v^2$

También se usa en la forma $Ec_e = h \cdot (\upsilon - \upsilon_0)$

La gráfica de la figura se corresponde con esta última fórmula.

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

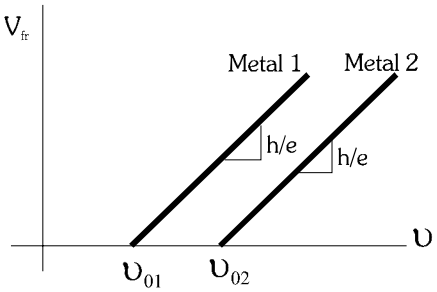


Potencial de frenado (ΔV_{fr}):

La Ec 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 $\Delta Ec = -\Delta Ep \rightarrow 0 - Ec_e = -e \cdot V_{fr} \rightarrow V_{fr} = \frac{Ec_e}{e}$

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).

♦ Explicación de Böhr de los espectros atómicos:

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, su energía permanece constante.

- El átomo emite radiación cuando un electrón salta de una órbita de mayor energía (más lejana) a otra de menor energía (más cercana). La energía emitida y la frecuencia están relacionadas por la expresión de Planck $E = h \cdot \upsilon$
- Cuando el átomo absorbe radiación, la energía de dicha radiación se emplea en el salto de un electrón hacia una órbita más alejada.

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.

7.4 DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO: 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.e.) se comporte como una onda en algunos experimentos?

El científico francés **de Broglie**, basándose en los resultados de Planck, Einstein y otros (Compton), supuso en 1924 que *cualquier partícula puede comportarse como una onda en algunas situaciones*. 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 cte 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 Niquel como red de difracción, comprobaron que las suposiciones de de Broglie eran ciertas.

Para una partícula macroscópica (p.ej. m = 1 kg, v = 10 m/s) $\lambda = 6{,}6 \cdot 10^{-35}$ 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 esta suposición 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 nº entero de veces la λ asociada.

7.5 PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISEMBERG; LÍMITES DE VALIDEZ DE LA FÍSICA CLÁSICA

Heisemberg, 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 Böhr: 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

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

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.

- 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.
- 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 Böhr para el átomo ya no es válido*, hay que buscar una nueva visión de las cosas, una nueva Física. Schrödinger, con su ecuación de onda, proporciona la herramienta básica de la **Física Cuántica**.

Validez de la Física Clásica:

La Física Cuántica será 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 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 ...).

PROBLEMAS DEL TEMA 7

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) *(**a)** $9{,}9 \cdot 10^{-28}$ J ; **b)** $3{,}6 \cdot 10^{-19}$ J ; **c)** $3{,}3 \cdot 10^{-15}$ J)*

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

a) υ de las OEM emitidas *(1200 kHz)*

b) Energía de los fotones ($7{,}9 \cdot 10^{-27}$ J)

c) Número de fotones emitidos por segundo si la potencia de la emisora es de 6 kW. ($7{,}6 \cdot 10^{29}$ *fotones/s)*

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. *($2{,}1 \cdot 10^{-19}$ J)*

b) Número de fotones emitidos por segundo y unidad de superficie para un haz de 10^{-3} W/m^2.

(dato: velocidad de la luz en el vacío = c = $3 \cdot 10^8$ m/s) *($2 \cdot 10^{15}$ fotones s^{-1} m^{-2})*

4.- Una radiación de 1,5 μm incide sobre el una superficie metálica y produce la emisión de fotoelectrones con una v = 10^5 m s^{-1}. Calcular:

a) Trabajo de extracción del metal *($1{,}25 \cdot 10^{-19}$ J)*

b) frecuencia umbral de fotoemisión *($1{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz)*

(dato: $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

5.- Calcular la λ asociada a :

a) Un electrón acelerado por una $\Delta V = 100$ V. *($1{,}23 \cdot 10^{-10}$ m)*

b) Un electrón de Ec = 1 eV *($1{,}23 \cdot 10^{-9}$ m)*

c) Una bala de 10 g que se mueve a 500 m s^{-1}. *($1{,}32 \cdot 10^{-34}$ m (insignificante))*

d) un automóvil de 1000 kg con v = 100 m/s. *($6{,}62 \cdot 10^{-39}$ m (insignificante))*

6.- 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)** $2{,}8 \cdot 10^{-7}$ m ; **b)** $1{,}2 \cdot 10^{-31}$ m (despreciable))*

7. Al iluminar una superficie metálica con una longitud de onda $\lambda_1 = 200$ nm, el potencial de frenado de los fotoelectrones es de 2 V, mientras que si la longitud de onda es $\lambda_2 = 240$ nm, el potencial de frenado se reduce a 1 V. Obtener:

a) Trabajo de extracción del metal

b) El valor que resulta para la cte de Planck, h, en esta experiencia.

(e = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; c = $3 \cdot 10^8$ m/s) *(**a)** $6{,}4 \cdot 10^{-34}$ J s ; **b)** $6{,}4 \cdot 10^{-19}$ J)*

ALGUNAS CUESTIONES TEÓRICAS:

1.- ¿Por qué la existencia de una frecuencia umbral para el efecto fotoeléctrico es un hecho que va en contra de la teoría ondulatoria?

2.- Dos colores del espectro visible, el rojo y el amarillo, por ejemplo ¿Pueden tener la misma intensidad? ¿Y la misma frecuencia? Razonar la respuesta.

3.- Supongamos que se ilumina el mismo metal con dos focos de la misma luz monocromática, uno de 100 W y otro de 500 W. ¿Cuál de los dos producirá mayor número de fotoelectrones? ¿Qué fotoelectrones abandonarán el metal con mayor energía?