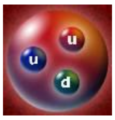


UNIDAD DIDÁCTICA Nº 10. FÍSICA CUÁNTICA.

1 EL MODELO CLÁSICO DE LA FÍSICA ES INSUFICIENTE.

Al final del siglo XIX parecía que se habían asentado definitivamente las bases de la Física.
- Mediante las leyes de Newton se explicaba la mecánica.
- El electromagnetismo quedaba perfectamente definido mediante la Teoría de Maxwell.
- La luz posee naturaleza ondulatoria y la materia está formada por partículas.

Sin embargo, en los últimos años del siglo XIX y primeros del XX se produce una auténtica revolución científica al descubrirse nuevos hechos que ponen en entredicho las teorías clásicas.
Así, al aplicar las leyes físicas conocidas a sistemas como el átomo se produce un fracaso absoluto. Esto dio lugar a la aparición de la Teoría cuántica.

Cuando una partícula se mueve a velocidades próximas a las de la luz tampoco son de aplicación las leyes clásicas. La mecánica de Newton debe sustituirse por la Teoría Especial de la Relatividad.
La luz puede exhibir tanto comportamiento ondulatorio como corpuscular y sorprendentemente, la materia también posee comportamiento ondulatorio y corpuscular. Ambos, materia y luz, tienen naturaleza dual, es decir, son a la vez onda y partícula.

En esta unidad vamos a hablar de la Física de lo muy pequeño, que denominamos Física Cuántica. Hay cuatro hechos fundamentales que dieron lugar a la aparición de ésta. Son:
- La radiación del cuerpo negro.
- El efecto fotoeléctrico.
- El efecto Compton.
- El carácter discontinuo de los espectros atómicos.

2 RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO. TEORÍA DE PLANCK.

2.1.- Radiación térmica emitida por un cuerpo.

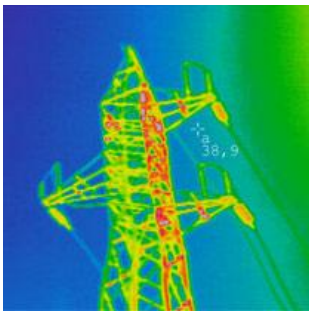
Cualquier cuerpo, por el mero hecho de tener una temperatura, emite energía en forma de radiación.

Se denomina radiación térmica de un cuerpo a la energía electromagnética que emite debido a la temperatura que posee. Esta energía emitida depende también de la composición del cuerpo.

La frecuencia de la radiación emitida depende de su temperatura. A temperatura baja, ésta no se ve, puesto que es fundamentalmente radiación infrarroja, pero si se eleva la temperatura, también sube la frecuencia de la radiación emitida. Por ejemplo, si la temperatura del filamento de una bombilla de incandescencia es relativamente baja, éste emite energía, pero no se ve la radiación (radiación infrarroja). A medida que su temperatura aumenta, la radiación emitida se hace visible.

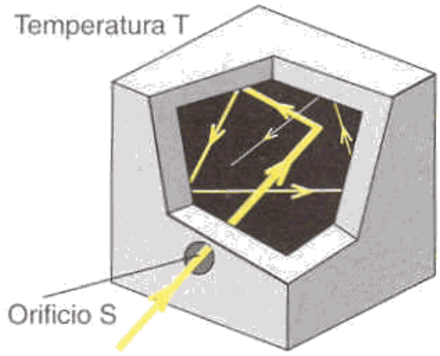
No debes confundir la radiación emitida por un cuerpo debido a su temperatura, con la luz reflejada por el mismo.

A fines del siglo XIX se intentaba explicar como se distribuye la energía que radia un cuerpo caliente. Para ello los científicos usaban un modelo simplificado ideal que fuese fácil de estudiar: el cuerpo negro.



La luz emitida por una torre de alta tensión no es apreciada por el ojo humano porque al no estar suficientemente caliente la luz que emite están en la zona del infrarrojo. Solo es percibida mediante cámaras especiales.
En cambio la luz emitida por un filamento de bombilla. es percibida por el ojo humano al estar más caliente. Al aumentar la temperatura la radiación emitida se hace visible para nuestro ojo.

2.2.- Definición de cuerpo negro.



Se denomina así a cualquier cuerpo capaz de absorber íntegramente cualquier radiación que le llegue desde el exterior, independientemente de su longitud de onda, sin reflejar nada.

En la práctica, una buena aproximación a un cuerpo negro, es un bloque hueco de metal recubierto en su interior que contiene unas paredes muy absorbentes y que se comunica por el exterior mediante un pequeño orificio. Si se calienta el bloque a una determinada temperatura, por la pequeña abertura escapará la radiación. Dentro de la cavidad, la energía radiante estará en equilibrio con las paredes.

En la segunda mitad del siglo XIX se consiguieron determinar experimentalmente una serie de leyes parciales sobre como se reparte la energía que escapa del cuerpo.

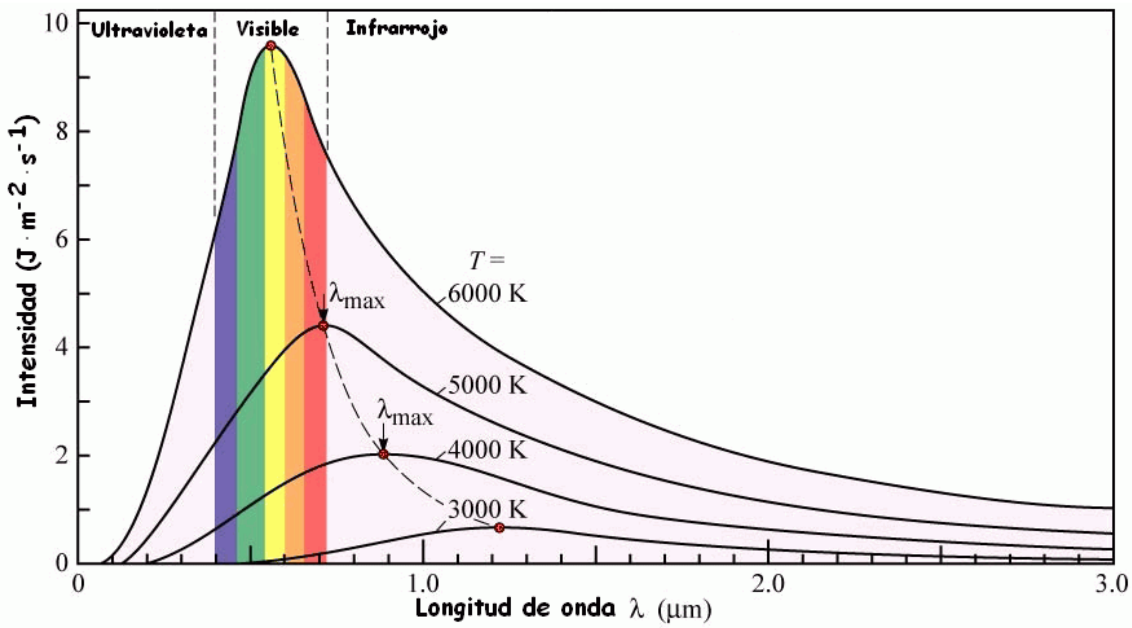
- Ley de Stefan –Boltzmann. Hace mención a la cantidad de energía total que escapa del cuerpo negro.
La energía total emitida por un cuerpo negro, por unidad de superficie y por unidad de tiempo es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta a la que se encuentre el cuerpo. Matemáticamente:

$$E_{TOTAL}=\sigma\cdot T^4$$

Donde E_{total} es la energía emitida por unidad de tiempo y de superficie. Se la conoce con el nombre de **intensidad de energía radiada**. Se mide en $J\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$.
T = temperatura absoluta en grados Kelvin.
σ = constante de Stefan-Boltzmann, de valor $5{,}67\cdot 10^{-8}\ J\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}\cdot T^{-4}$.

- Ley de Wien:
En 1893, el alemán **Wilhelm Wien** (1864-1928) descompuso mediante un espectroscopio, la luz emitida por un cuerpo negro y se representa en función de la longitud de onda, se obtiene una

distribución como la que aparece en la figura. Esta distribución es continua. Y para cada distribución de onda existe un máximo de energía radiante emitida.



Esto es lo que le ocurre a una bombilla. Al conectar la bombilla a una fuente de tensión, el filamento empieza a brillar, lo que significa que ha aumentado su temperatura. Además, si aumentamos la tensión, el filamento brilla cada vez más, pasando desde el rojo al amarillo y finalmente al blanco.
Lo mismo le sucede al cuerpo negro ideal. Si se representa la intensidad de la radiación emitida en función de la longitud de onda podemos comprobar que el área comprendida entre la curva y el eje de abcisas aumenta con la temperatura, lo que significa que un cuerpo más caliente emite más energía por unidad de superficie que un cuerpo menos caliente.
Además se observa que a mayor temperatura, disminuye la longitud de onda a la que se produce la intensidad máxima, es decir, que se emite cada vez más luz dentro de la zona que nuestro ojo puede ver.

Analizando los datos, puede deducirse una expresión matemática que nos permita relacionar la temperatura con la longitud de onda que proporciona una intensidad emitida máxima. Esta ley se la conoce como **Ley de Wien.**

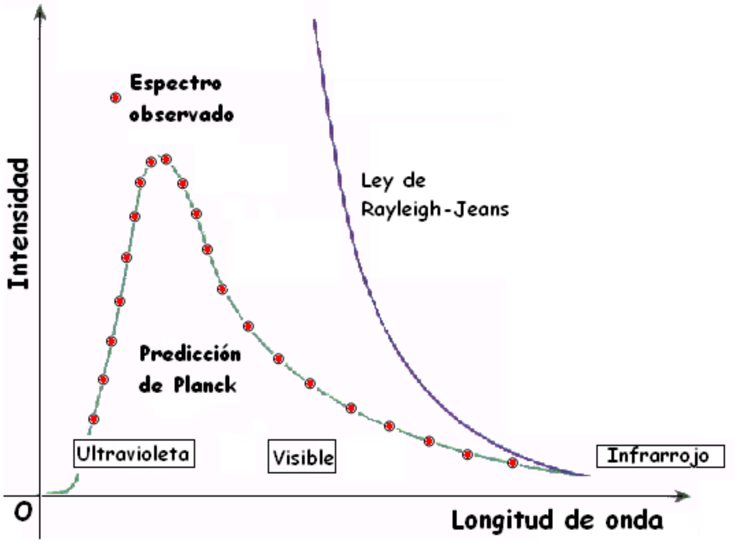
La longitud de onda, para la cual la intensidad emitida es máxima, disminuye al aumentar la temperatura.

Matemáticamente:

$$\lambda_{máx} \cdot T = b$$

Donde:
λ_m representa la longitud de onda donde la densidad de energía emitida es máxima. Se mide en m.
T representa la temperatura absoluta, en grados Kelvin.
b es una constante que vale $2{,}898 \cdot 10^{-3}$ K · m.

Los resultados experimentales obtenidos por Wien, contradicen la teoría clásica de la radiación. Según la teoría, clásica, la longitud de onda de la radiación emitida y la intensidad deben estar relacionadas. Al calentar un cuerpo, el cuerpo debe emitir siempre mayor intensidad de radiación y además, el valor de mayor intensidad debía corresponder a la frecuencia más grande emitida (menor longitud de onda).



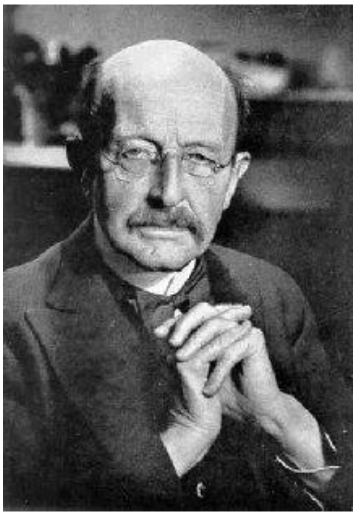
Sin embargo lo que se observa es que para cada temperatura, al aumentar la longitud de onda la intensidad aumenta, pero a partir de una determinada longitud de onda (situada en el ultravioleta), la intensidad decrece y llega a hacerse prácticamente nula. A este fenómeno se le denomina **catástrofe del ultravioleta**.

Hubo intentos de encontrar alguna expresión matemática que permitiera relacionar la densidad de energía emitida con la Temperatura y la longitud de onda (o la frecuencia). El más conocido es la **Ley de Rayleigh-Jeans**, pero no tuvo éxito.

En conclusión: las leyes y teorías físicas existentes a fines del siglo XIX no podían explicar la emisión de energía por radiación.

2.3.- Teoría cuántica de Planck.

Fue Max Planck, en 1900, quien sentó las bases de una nueva teoría, la **teoría cuántica**.



Max Planck (1858 -1947)

Planck afirmó en su teoría, que cualquier cuerpo negro emite energía pero no de forma continua sino discreta. Las radiaciones se emiten en paquetes de energía que se denominan **cuantos**. Esto implica que la energía está cuantizada. Un cuerpo solamente puede emitir un determinado número entero de cuantos de energía
La energía de un cuanto depende del tipo de radiación según la expresión:

$$\boxed{E = h \cdot f}$$

Donde **f** es la frecuencia de la radiación emitida y **h** una constante, llamada **constante de Planck.**, de valor h = $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J·s

Basándose en esta hipótesis pudo deducir una ecuación para la radiación térmica, cuya gráfica coincide con la obtenida experimentalmente.

La radiación térmica demuestra que la energía de la radiación (luz, ondas de radio, rayos X...) está cuantizada. Esto significa que cuando se gana o pierde energía por radiación solo se cambia a saltos. Un símil podría ser la rampa y la escalera. Hasta el siglo XIX los científicos pensaban que la radiación variaba de forma continua como en una rampa, pero se demostró que no era así sino como una escalera.

Esto fue una auténtica revolución. Muchas cantidades que se creían continuas resultaron ser discontinuas, o *discretas,* como dicen los físicos. Afortunadamente el efecto de la cuantización sólo es apreciable en la escala más pequeña, la de los átomos y las partículas elementales. Con los objetos de la vida diaria podemos despreciar ese efecto y seguir suponiendo que la energía y otras cantidades cambian continuamente.

Las energías muy pequeñas, como las que se ponen en juego en los átomos, se suelen medir muchas veces en electrón-voltio (eV). Un electrón-voltio equivale en valor a la energía cinética que adquiere un electrón cuando se le somete a una diferencia de potencial de 1 V. Por tanto 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

Para resolver

1.- ¿Cuál es la longitud de onda que corresponde a un fotón cuya energía es 1 eV? ¿En qué región del espectro electromagnético se encuentra? Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}.
Sol.: $1,24 \cdot 10^{-6}$ m; en el infrarrojo.

2.- La llama amarilla de una lámpara de sodio emite fotones con una longitud de onda de 550 nm. ¿Qué energía poseen dichos fotones? Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s-1. Sol.: 2,25 eV.

3.- Determina la energía de un cuanto de: a) una onda de radio de 1500 kciclos·s^{-1}; b) luz verde de λ = 550 nm; c) rayos X de λ = 0,6 Å. Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}
Sol.: $9,9 \cdot 10^{-28}$ J; $3,6 \cdot 10^{-19}$ J; $3,3 \cdot 10^{-15}$ J.

4.- La longitud de onda de la luz roja es de 650 nm. Calcula la energía de un fotón de esta radiación en J y en eV. Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1} Sol.: 1,9 eV = $3,05 \cdot 10^{-19}$ J.

5.- Una estación de radio emite con longitud de onda de 25 m. Calcula: 1) La frecuencia de la radiación; 2) La energía correspondiente a un fotón; 3) El número de fotones emitidos cada segundo si la potencia de la emisora es de 6 kW. Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}
Sol.: $1,2 \cdot 10^{7}$ hz; $7,9 \cdot 10^{-27}$ J; $7,6 \cdot 10^{29}$ fot·s^{-1}.

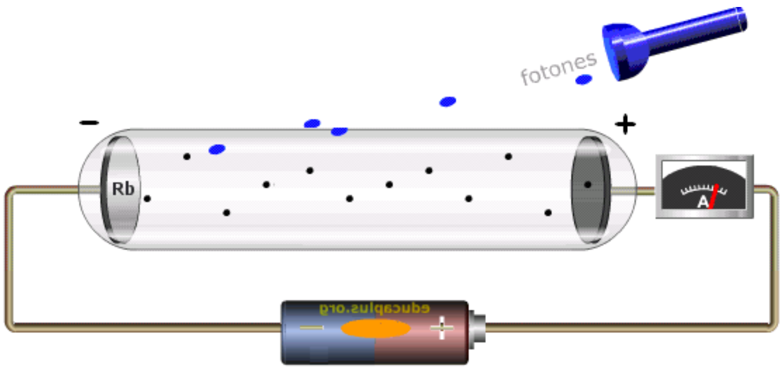
3 EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Este fenómeno fue descubierto por el alemán **Heinrich Hertz** (1857-1894) en 1887.

Se denomina efecto fotoeléctrico al proceso mediante el cual un metal emite electrones al ser iluminado por una luz de frecuencia adecuada.

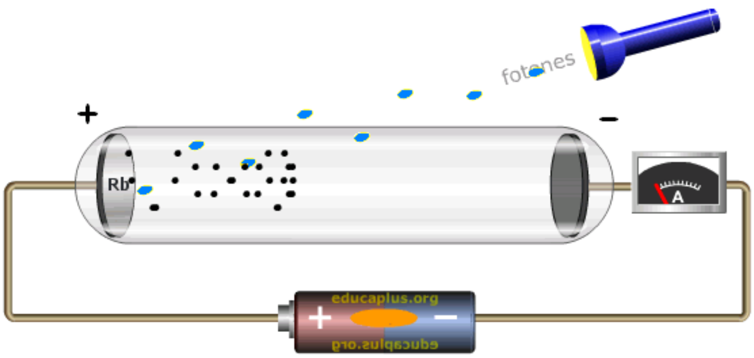
El efecto puede observarse en la denominada **célula fotoeléctrica**. Es una ampolla de vidrio opaca excepto por una zona donde puede entrar la luz e incidir directamente sobre el cátodo.
Dentro de la ampolla se ha hecho el vacío para permitir el movimiento de los electrones y se colocan dos láminas metálicas. Una hace de cátodo (polo negativo), conectada al polo negativo de una fuente de alimentación y la otra de ánodo (polo positivo), conectada al polo positivo.

Al incidir la luz adecuada sobre el cátodo, arranca electrones que son atraídos por el ánodo debido a que existe una diferencia de potencial. El galvanómetro medirá entonces paso de corriente.



Se hicieron estudios cuantitativos sobre el efecto fotoeléctrico y se llegaron a las siguientes conclusiones experimentales:

1.- Para cada metal, solo se produce efecto fotoeléctrico si la frecuencia de la luz utilizada es mayor de una frecuencia límite denominada **frecuencia umbral f_o**. En caso contrario no se verifica el fenómeno aunque aumentemos la intensidad de la luz.
2.- Al producirse el fenómeno este es instantáneo aunque la intensidad sea baja.
3.- Si la frecuencia de la luz que incide sobre el cátodo es mayor que el valor umbral, la intensidad de la corriente eléctrica producida es proporcional a la intensidad de la radiación.
4.- La energía cinética de los electrones aumenta con la frecuencia de la luz.
5.- Si invertimos la polaridad de la batería, la corriente disminuye, tanto más cuanto mayor sea la tensión aplicada, existiendo un valor mínimo denominado **potencial de corte o de frenado** a partir del cual no se produce emisión, al impedir la diferencia de potencial que los electrones lleguen al otro electrodo.



El fenómeno no era posible justificarlo mediante la teoría ondulatoria de la luz, porque según ésta, al aumentar la intensidad de la luz lo suficiente se deberían producir fotoelectrones fuese cual fuese la frecuencia puesto que la onda luminosa debía llevar más energía (recuerda que la energía de una onda aumenta con el cuadrado de la frecuencia). Al aumentar la intensidad de la onda, ésta llevaría más energía, luego debería haber un momento en el que la energía que transportase la onda fuese suficiente para extraer electrones de la superficie del metal.

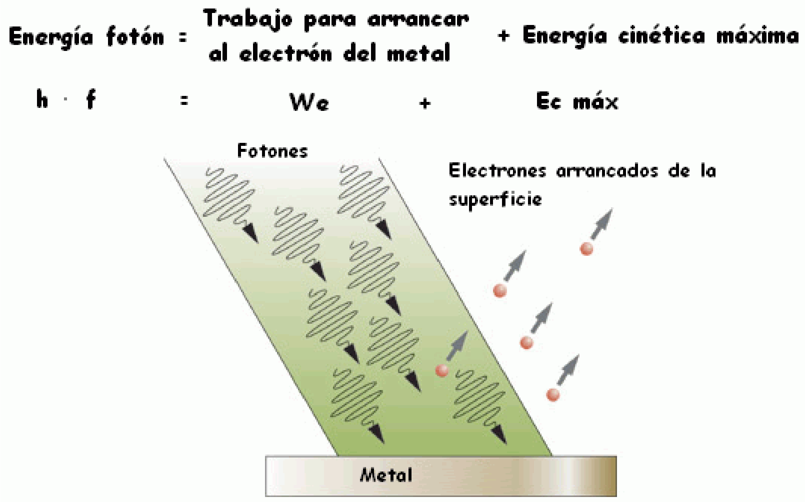
En 1905 Einstein fue capaz de explicar el efecto fotoeléctrico. Para ello aplicó las ideas de Planck sobre la cuantización en la radiación térmica.
Einstein propuso las siguientes hipótesis:
1.- La radiación es emitida y también es captado por cuantos o paquetes de energía a los que denominó **fotones**.
Cada fotón posee una energía que puede calcularse según la expresión:

$$E = h \cdot f$$

Y una cantidad de movimiento que puede calcularse según:

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

Siendo f la frecuencia del movimiento ondulatorio y h la constante de Planck.
Los fotones se mueven siempre a la velocidad de la luz. Además tienen masa en reposo nula.
2.- El efecto fotoeléctrico se produce cuando un electrón interacciona con un único fotón, pero solamente si la energía del fotón es suficiente para arrancarlo del metal.



Mediante esta concepción nueva de la luz, pueden explicarse los hechos experimentales. Así:
- Únicamente los fotones que poseen energía E, mayor o igual al trabajo necesario para extraer el electrón del metal, denominado **trabajo de extracción (We)**, podrán producir el efecto fotoeléctrico. Esto implica que la radiación debe tener una frecuencia umbral o mínima (f_o) por debajo de la cual no se produce el efecto fotoeléctrico. Esta frecuencia umbral es distinta para cada metal y también depende del estado de la superficie metálica (grado de limpieza, óxidos, etc)
De esta forma podemos escribir que la energía mínima necesaria para extraer un fotón viene dada por:

$$We = h \cdot f_o$$

- Si el fotón posee exceso de energía, el exceso es transformado en energía cinética del electrón arrancado con lo que podemos escribir que:

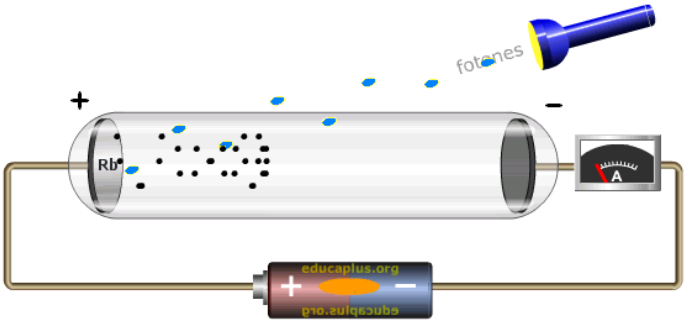
$$E = h \cdot f_o + Ecmáx$$

Donde E representa la energía del fotón incidente. Y Ec máx, el valor máximo de energía cinética que pueden conseguir los fotoelectrones.
Como $E = h \cdot f$, sustituyendo:

$$\boxed{h \cdot f = h \cdot f_o + Ecmáx}$$

- Si la radiación es tal que puede extraer electrones del metal, al aumentar la intensidad de la radiación, aumenta el número de fotones pero todos seguirán teniendo la misma energía. Por tanto aumenta también el número de fotoelectrones emitidos, aunque no la energía de estos ya que los

fotones no tienen más energía.
- Si la radiación no puede extraer electrones del metal, no se extraerán electrones por mucho que aumente la intensidad de la radiación, pues cada fotón individual no tiene energía suficiente.
- Si se invierte la polaridad entre los electrodos, se observa que a partir de una determinada diferencia de potencial ningún electrón alcanza el otro electrodo. A esta diferencia de potencial se la denomina potencial de frenado o de corte.



Matemáticamente se cumple que:

$$\boxed{E_{c\,máx} = |e| \cdot (V_A - V_B) = h(f - f_o) = h \cdot f - W_e}$$

Ejercicio resuelto

1.- Al iluminar la superficie de un cierto metal con un haz de luz ultravioleta de longitud de onda 150 nm, la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos es de 2,5 eV.
a) Determine el trabajo de extracción del metal, la frecuencia umbral así como el potencial de corte.
b) Explica qué ocurriría si la frecuencia de la luz incidente fuera: i) 2f; ii) f/2.
c) ¿Podría aumentarse la energía cinética de los fotoelectrones usando más intensidad de luz? Justifica tu respuesta.
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m/s.
Solución:

a.- Teniendo en cuenta el principio de conservación de la energía:
La energía del fotón se emplea en extraer el electrón del metal y el resto en energía cinética del electrón.
Matemáticamente:
$h \cdot f = W_e + E_{c\,máx}$
Despejando We:
$W_e = h \cdot f - E_{c\,máx}$.
Necesitamos la frecuencia de la radiación incidente. Para ello, como:

$c = \lambda \cdot f$ $\qquad$ $f = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{3.10^{8}}{150.10^{-9}} = 2 \cdot 10^{15}$ Hz

Y la energía cinética en julios es: $E_c = 2{,}5 \text{ eV} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 4 \cdot 10^{-19}$ J
Sustituyendo:
$W_e = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{-19} =$ $\underline{\mathbf{9{,}2 \cdot 10^{-19}\ J}}$
Conocido el trabajo de extracción, podemos averiguar la frecuencia umbral. Para ello como:

$W_e = h \cdot f_o$ $\qquad$ $f_o = \dfrac{W_e}{h} = \dfrac{9{,}2.10^{-19}}{6{,}6.10^{-34}} =$ $\underline{\mathbf{1{,}39 \cdot 10^{15}\ Hz}}$

El potencial de corte lo averiguamos mediante el principio de conservación de energía. Al establecer una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo que impida de los electrones avancen se cumplirá que:

$e \cdot V_{corte} = Ec\ máx = h(f - f_o)$

Sustituyendo:

$e \cdot V_{corte} = 4 \cdot 10^{-19}$ J $\qquad V_{corte} = \frac{4 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}}$ = **2,5 V**

b.- Si la frecuencia fuese doble, el fotón incidente tendría más energía, con lo cual, como el trabajo de extracción es constante (depende únicamente de las características del metal) el exceso de energía del fotón, se emplearía el aumentar la energía cinética del electrón. Con lo cual, la nueva energía cinética sería:

$h \cdot f = We + Ec\ máx \qquad Ec\ máx = h \cdot f - We = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 4 \cdot 10^{15} - 9,2 \cdot 10^{-19} = 1,72 \cdot 10^{-18}$ J

Si la frecuencia fuese la mitad, no se produciría efecto fotoeléctrico, pues la frecuencia umbral es $1,39 \cdot 10^{15}$ Hz y la radiación incidente tendría de frecuencia solamente $1 \cdot 10^{15}$ Hz.

c.- Eso es imposible. La intensidad de la luz, lo que haría sería aumentar el número de fotones y por tanto el de fotoelectrones si la frecuencia de la luz supera al valor umbral, pero en ningún caso aumentaría la energía de estos, porque aunque el número de fotones sea mayor, no sería mayor energía de estos, puesto que la energía de un fotón depende de la constante de Planck y de la frecuencia y no de la intensidad de la radiación.

$$E_{fotón} = h \cdot f.$$

Para resolver

6.- Una superficie metálica emite electrones cuando se ilumina con luz verde, pero no cuando se ilumina con luz amarilla. ¿Qué ocurrirá si se ilumina con luz azul? ¿Y si se hace con luz roja? ¿Por qué? Sol.: ¿?

7.- Si iluminamos la superficie de un cierto metal con un haz de luz ultravioleta de frecuencia $2,1 \cdot 10^{15}$ Hz, los fotoelectrones emitidos tienen una energía cinética máxima de 2,5 eV.

a) Explica por qué la existencia de una frecuencia umbral para el efecto fotoeléctrico va en contra de la teoría ondulatoria de la luz.

b) Calcule la función trabajo del metal y su frecuencia umbral.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Sol.: b) $We = 9,92 \cdot 10^{-19}$ J; $f_o = 1,5 \cdot 10^{15}$ Hz.

8.- Se trata de medir el trabajo de extracción de un nuevo material. Para ello se provoca el efecto fotoeléctrico haciendo incidir una radiación monocromática sobre una muestra A de ese material y, al mismo tiempo, sobre otra muestra B de otro material cuyo trabajo de extracción es $W_B = 5$ eV. Los potenciales de frenado son $V_A = 8$ V y $V_B = 12$ V, respectivamente. Calcule:

a) La frecuencia de la radiación utilizada.

b) El trabajo de extracción W_A.

Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Sol.: $f = 4,12 \cdot 10^{15}$ Hz; b) W_A) 9 eV

9.- Al incidir luz de longitud de onda 620 nm sobre la superficie de una fotocélula, se emiten electrones con una energía cinética máxima de 0,14 eV. Determina:

a) El trabajo de extracción del metal, la frecuencia umbral y el potencial de frenado que anula la fotoemisión.

b) Si la fotocélula se iluminara con luz de longitud de onda doble que la anterior, ¿cuál sería la energía cinética máxima de los electrones emitidos?

c) Explique, con ayuda de una gráfica, cómo varía la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos al variar la frecuencia de la luz incidente.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m·s^{-1}; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Sol.: a) W_e = 2,98 ·10^{-19} J (1,87 eV); f_o = 4,49 ·10^{14} Hz; Vcorte = 0,14 V; b) ¿?

10.- Si se duplica la frecuencia de la radiación que incide sobre una placa de metal, ¿se duplica la energía cinética de los electrones extraídos? ¿Por qué?

11.- Al iluminar la superficie de un metal con luz de longitud de onda 280 nm, la emisión de fotoelectrones cesa para un potencial de frenado de 1,3 V.

a) Determine la función trabajo del metal y la frecuencia umbral de emisión fotoeléctrica.

b) Cuando la superficie del metal se ha oxidado, el potencial de frenado para la misma luz incidente es de 0,7 V. Razone cómo cambian, debido a la oxidación del metal: i) la energía cinética máxima de los fotoelectrones; ii) la frecuencia umbral de emisión; iii) la función trabajo.

Datos: c = 3 · 10^8 m s^{-1} ; h = 6,6 · 10^{-34} J s ; e = 1,6 · 10^{-19} C.

Sol.: a) W_e = 3,12 eV; f_o = 7,56 · 10^{14} Hz; b) Ec máx disminuye; W_e aumenta y f_o aumenta.

12.- El trabajo de extracción del aluminio es 4,2 eV. Sobre una superficie de aluminio incide radiación electromagnética de longitud de onda 200 · 10^{-9} m. Calcule razonadamente:

a) La energía cinética de los fotoelectrones emitidos y el potencial de frenado.

b) La longitud de onda umbral para el aluminio.

Datos: h = 6,6 · 10^{-34} J s ; c = 3 · 10^8 m s^{-1} ; 1 eV = 1,6 · 10^{-19} J

Sol.: a) Ec máx = 3,18 ·10^{-19} J; V = 2 V; b) 295 nm.

4 EFECTO COMPTON.

Descubierto por el norteamericano **A. M. Compton**. Consiste en el cambio de dirección (dispersión) de la radiación electromagnética al interaccionar con electrones libres que se encuentran en reposo. Se comprueba que la radiación que se recoge después del choque tiene una longitud de onda mayor que la inicial y una energía menor, relacionándose ambas mediante la expresión:

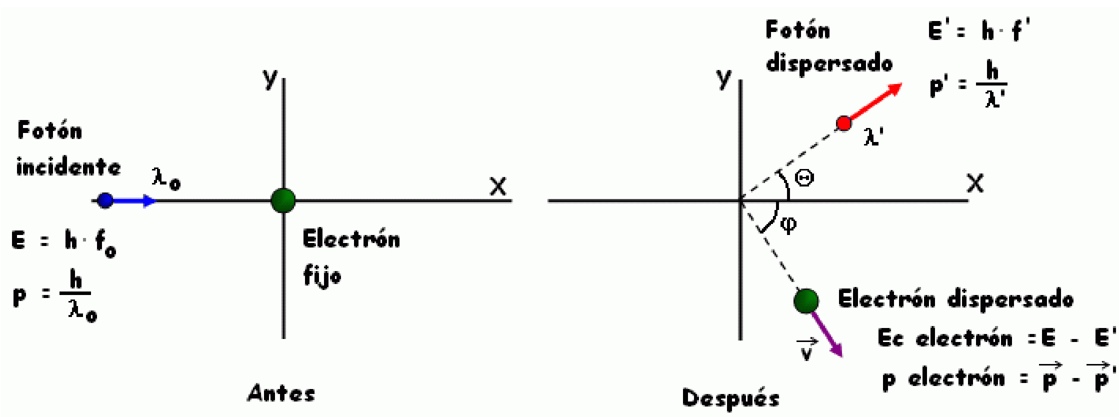
$$\boxed{\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos\Theta)}$$

donde λ_c es una constante determinada experimentalmente denominada **longitud de onda Compton** para el electrón, cuyo valor es :

λ_c = 2,42·10^{-12} m

La única explicación posible es suponer que la radiación está formada por fotones que chocan con los electrones de forma similar a un choque clásico. El fotón pierde parte de su energía que cede al electrón, saliendo este último con una velocidad v.

$$E' < E \rightarrow \Delta E = \text{Ec del electrón}$$



Para resolver

13.- En un experimento Compton se hace incidir un fotón de frecuencia υ = $3 \cdot 10^{18}$ Hz sobre un electrón en reposo. Si el fotón dispersado sale con un ángulo de 30º, respecto de la dirección de incidencia:
a.- Calcula la dirección en la que sale el electrón después de la interacción, así como su velocidad.
b.- ¿A qué zona del espectro pertenece el fotón incidente? ¿Y el dispersado? ¿Cuál es la longitud de onda de éste último?
(Trabájese en la aproximación no relativista)
Datos: $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}; $\lambda_c = 2{,}42 \cdot 10^{-12}$ m.
Sol.: θ = 75,05º; $v = 3{,}79 \cdot 10^{6}$ m/s; b) rayos X; rayos X; $\lambda = 1{,}003 \cdot 10^{-10}$ m.

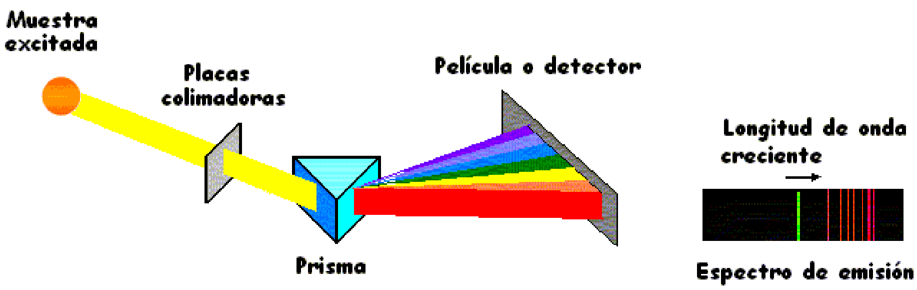
5 ESPECTROS ATÓMICOS.

5.1.- El espectroscopio.

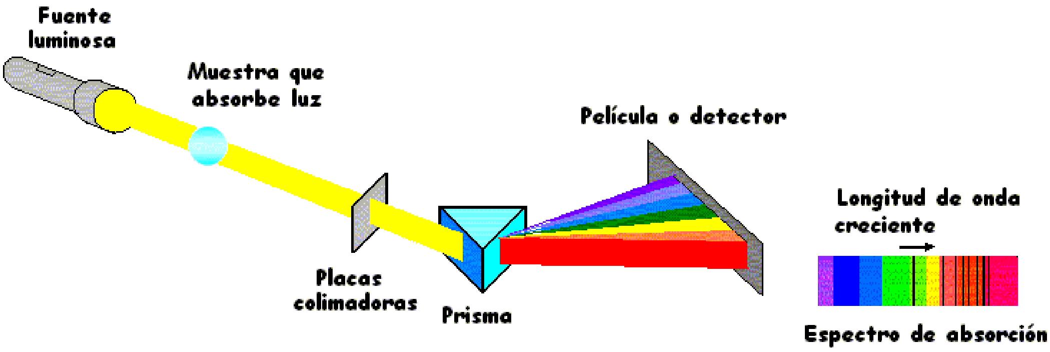

Espectroscopio de Bunsen y Kirchhoff

En 1859, los alemanes **Gustav Kirchhoff (1824-1887)** y **Robert Bunsen (1811-1899)** descubren que al arder una sustancia pura emite una luz característica, típica de cada sustancia. Dispersando esa luz haciéndola atravesar un prisma o una red de difracción, se obtiene una imagen típica de la sustancia, que se puede recoger sobre una placa fotográfica. Esto es lo que se denomina un **espectro de emisión**, que sirve para identificarla, algo así como sus huellas luminosas.
El aparato con el que realizaron sus experimentos se denomina **espectroscopio**. En poco tiempo se convirtió en el instrumento de análisis más utilizado, no sólo por ellos sino también por numerosos científicos de su época.
Si el espectroscopio tiene un dispositivo para medir las longitudes de onda correspondientes a cada línea, se llama **espectrómetro**.

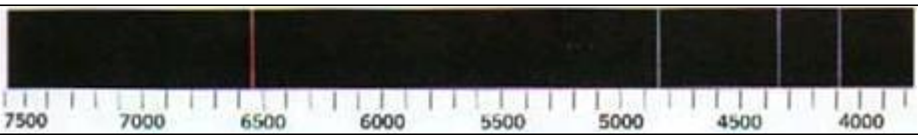
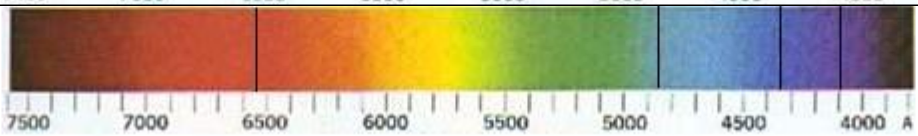
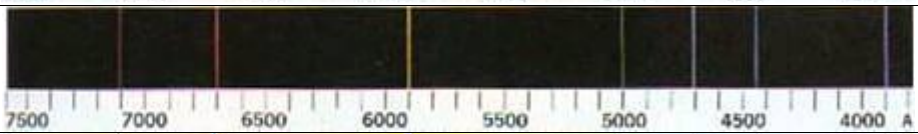
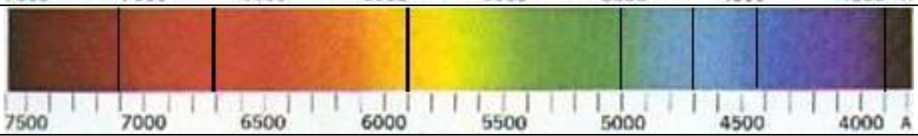
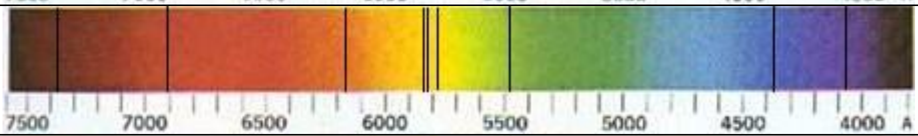
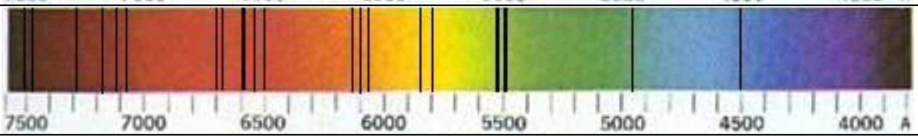
Si a los átomos de un elemento que se encuentra en estado gaseoso, se le suministra energía, bien por calentamiento o bien mediante una descarga eléctrica, se puede comprobar que emiten radiación electromagnética. Esta radiación se puede recoger en una placa fotográfica, con lo que tendremos el espectro de emisión de un elemento que consiste en un fondo oscuro con unas rayas coloreadas.



También es posible obtener el espectro de absorción de un elemento. Para ello se toma la muestra a analizar y se le hace pasar la luz a su través. Después esa luz se lleva al espectroscopio y se recoge en una placa fotográfica. Observaremos unas bandas coloreadas con unas rayas negras. Esto constituye el espectro de absorción del elemento.



Puede observarse que el espectro de absorción y de emisión son complementarios, es decir:
Toda muestra absorbe cuando es iluminada, la misma luz que emite cuando es excitada mediante calentamiento o descarga eléctrica.

ESPECTROS ATÓMICOS	
ELEMENTO Y REGIÓN	**ESPECTRO**
Hidrógeno (VIS) Emisión	
Hidrógeno VIS Absorción	
Helio VIS Emisión	
Helio VIS Absorción	
Mercurio VIS Emisión	
Mercurio VIS Absorción	
Bario VIS Emisión	
Bario VIS Absorción	

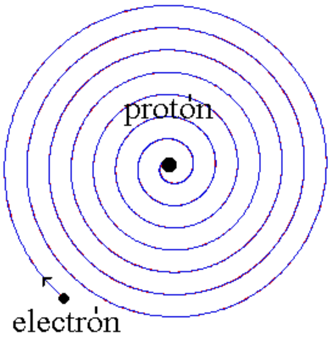
6 MODELO ATÓMICO DE BOHR.

Cuando sometemos a los átomos a descargas eléctricas o a calor, los electrones saltan desde niveles permitidos de menor energía a otros de energía mayor, el electrón (y por tanto el átomo se encuentran en un estado excitado). Este estado es **inestable**, por lo que al cabo de un tiempo el electrón vuelve a caer al estado de mínima energía o fundamental. El proceso se hace en uno (e incluso a veces en varios saltos), emitiendo uno o varios fotones de luz. Estos fotones, recogidos corresponden a las distintas líneas que se observan en el espectro de emisión.

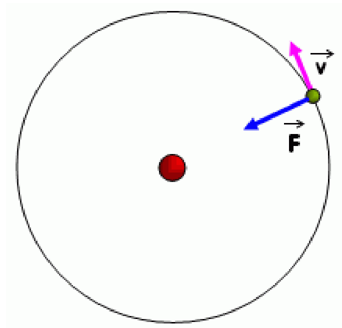
Bohr, basándose en la hipótesis cuántica de Planck y Einstein dio una explicación al espectro de emisión de los gases, muy especialmente al del hidrógeno, dando lugar en 1913 a un nuevo modelo atómico que puede considerarse el verdadero precursor del modelo atómico actual.

El modelo atómico de Bohr se basa en tres principios o postulados:

1º. El electrón se mueve alrededor del núcleo describiendo órbitas circulares sin emitir energía radiante. Solo lo hace cuando cambia de órbita.
De esta forma Bohr rompe con la Teoría de Maxwell según la cual, una carga sometida a una aceleración emite energía radiante. De esta forma la carga perdería velocidad y se precipitaría sobre el núcleo.



Según la Teoría de Maxwell, debería suceder esto.



Bohr impone la condición de que no se cumple la Teoría de Maxwell.

2.- De las infinitas órbitas posibles según el primer postulado, solamente son posibles aquellas en las que el momento angular del electrón sea un múltiplo entero de $\frac{h}{2\pi}$, donde h es la constante de Planck.
Matemáticamente:

$$mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

n recibe el nombre de **número cuántico principal** y define los niveles alrededor del núcleo, numerados a partir del núcleo. Puede tomar los valores positivos y enteros desde 1 hasta ∞.
Esto significa que tanto el radio como la energía de las órbitas están cuantizados, dependen del número cuántico principal n, y no pueden adquirir cualquier valor. Cuando el electrón se encuentra en el estado fundamental (primera órbita), tiene menor energía que cuando está en un estado excitado (una órbita más externa).

3º. Siempre que un átomo absorbe o emite energía, lo hace mediante cuantos completos de valor *h · f,* y como consecuencia el electrón experimenta un tránsito entre niveles. Así el valor del cuanto absorbido o emitido se puede calcular mediante la expresión:

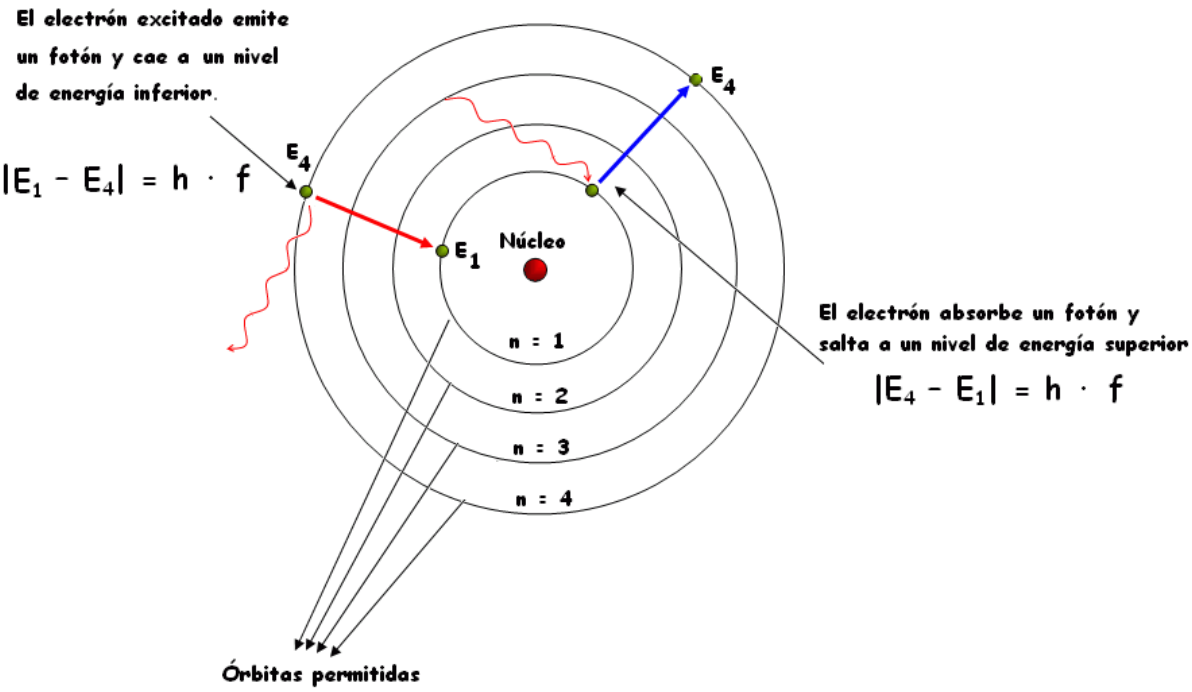
$$|E_2 - E_1| = h.f$$

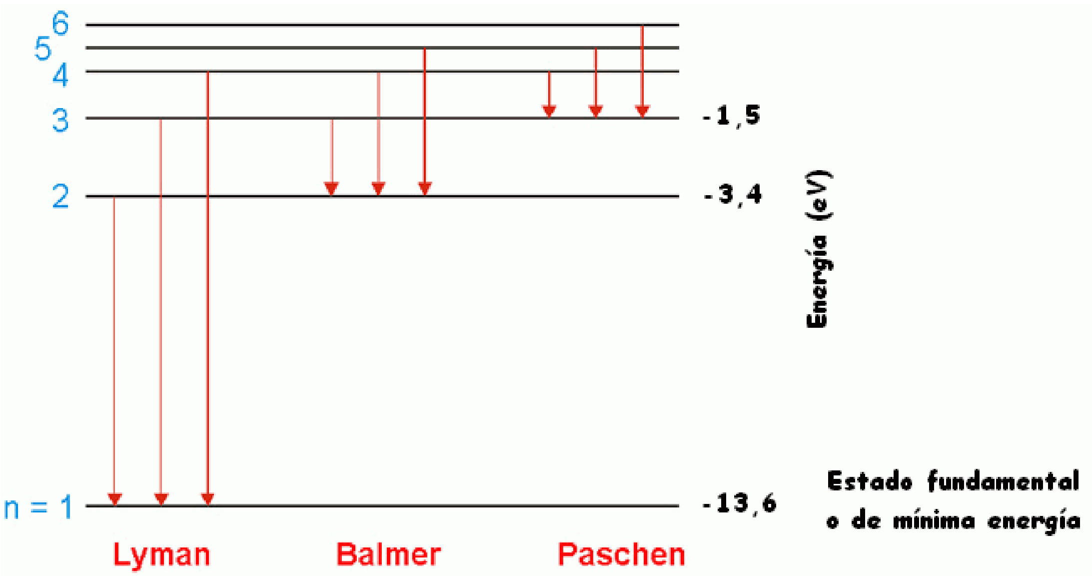
donde:

E_2 = energía del nivel final.

E_1 = energía del nivel inicial.

Si el electrón pasa de una órbita de menor energía (más interna) a otra de mayor energía (más externa), absorberá energía. En cambio, si pasa de una órbita de mayor energía a otra de menor, desprenderá energía en forma de fotón, cuya frecuencia viene dada por la ecuación de Planck.





En la figura se muestra alguno de los saltos electrónicos posibles para el átomo de hidrógeno. Cada uno de los saltos corresponde a una línea en el espectro del hidrógeno.

7 MECÁNICA CUÁNTICA.

7.1.- La necesidad de un nuevo modelo.

A pesar del éxito inicial de la teoría de Bohr, pronto se demostró que era insuficiente para explicar los espectros de los átomos con más de un electrón (átomos polielectrónicos). Era necesario desarrollar una nueva teoría que se denominó "**mecánica cuántica**", que sirviera para describir mejor las partículas.
Esta teoría es la única capaz de explicar el comportamiento de la naturaleza a escala atómica o inferior. Por ejemplo la estructura de los átomos, la radiactividad, el enlace químico, etc.
Esta teoría está basada en cuatro principios:
1.- Cuantización de la energía de Planck y Einstein.
2.- Dualidad onda-corpúsculo de Louis De Broglie.
3.- Principio de incertidumbre de Werner Heisenberg.
4.- La ecuación de ondas de Erwin Schrödinger.

7.2.- Hipótesis de De Broglie. Dualidad onda-corpúsculo.


Louis de Broglie (1892 – 1987)

Ya has estudiado como hay fenómenos luminosos que pueden describirse mediante el modelo ondulatorio de la luz. En este modelo, una onda se caracteriza por poseer una longitud de onda, una frecuencia, etc. En cambio otros necesitan describirse mediante el modelo corpuscular. Una partícula se caracteriza por poseer una masa, una posición, una velocidad, etc.
Por este motivo hablamos siempre de la característica dual de la luz, ya que puede comportarse como onda o como material.

En 1924 el francés Louis de Broglie observó que la materia podría comportarse también como una onda o como una partícula y enunció la conocida **dualidad onda-corpúsculo**:

Cualquier partícula en movimiento lleva asociada una onda.

La longitud de onda asociada a cualquier partícula puede calcularse mediante la ecuación:

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

Siendo **p** la cantidad de movimiento de la partícula:

$$\boxed{p = m \cdot v}$$

La cantidad de movimiento de la partícula también se puede averiguar conocida su masa y su energía cinética. Para ello:

Como $p = m \cdot v$ y $Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ Observa que:

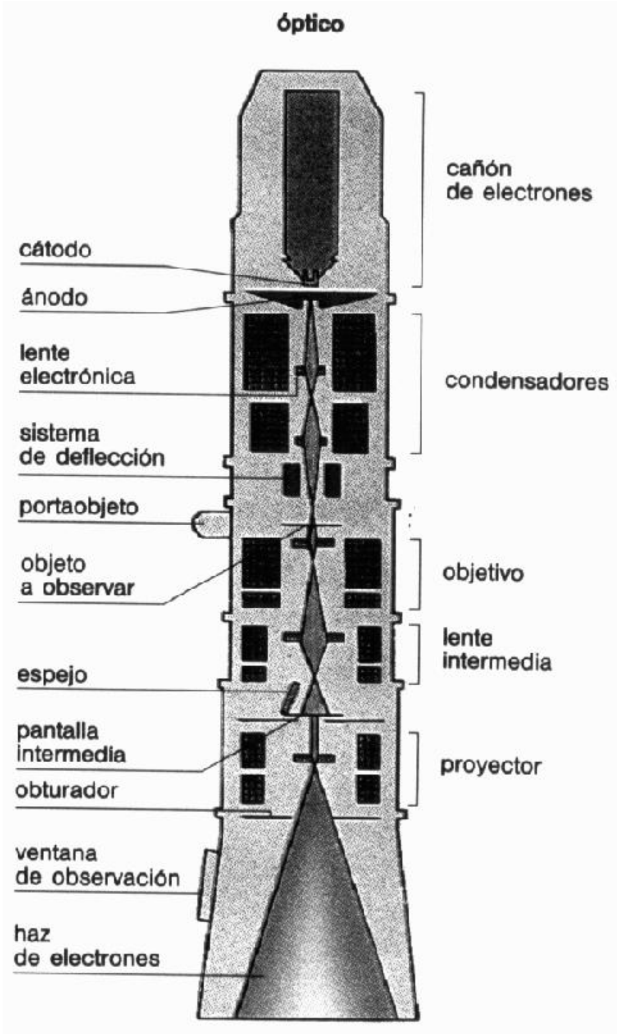
$$Ec = \frac{1}{2} m \cdot \frac{m}{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2m} \cdot p^2 \qquad Ec = \frac{1}{2m} \cdot p^2$$ De donde:

$$\boxed{p = \sqrt{2 \cdot m \cdot E_c}}$$

Si el cuerpo tiene una masa grande, la longitud de onda es tan pequeña que no se observa la característica ondulatoria. En cambio, si los cuerpos son muy pequeños (electrones, protones, etc.) entonces la longitud de onda si se puede apreciar.
De hecho, la confirmación experimental de la hipótesis de De Broglie llegó cuando los físicos norteamericanos L. Germer y C. Davisson y el inglés G. Thomson, lograron producir difracción en un haz de electrones.

El microscopio electrónico.
Es una aplicación práctica de la dualidad onda-corpúsculo de los electrones.

El poder de resolución del microscopio óptico tiene un límite puesto que cuando el objeto a ver es muy pequeño, (del orden de unos 500 nm), la luz visible se difracta sobre él, con lo cual, a partir de ahí no se pueden distinguir bien los objetos.
Pero si podemos utilizar otro sistema que nos permita utilizar longitudes de onda menores, podemos aumentar la resolución. Para ello se diseñó el microscopio electrónico, que en lugar de utilizar luz visible, emplea un haz de electrones acelerados por una diferencia de potencial de varios cientos de kV. La longitud de onda de estos electrones es mucho menor que la de la luz visible y se pueden lograr muchísimos más aumentos que con el microscopio óptico.



Básicamente en un microscopio electrónico un haz de electrones es acelerado mediante una diferencia de potencial elevada para mediante unas lentes magnéticas ser enfocado sobre el objeto a analizar. Posteriormente, mediante otras lentes proyectoras se forma sobre una pantalla la imagen del objeto.
De esta forma se obtienen imágenes planas del objeto a analizar. Otros microscopios, como el de barrido, permiten obtener imágenes en tres dimensiones.

7.3.- El principio de incertidumbre de Heisenberg.

Según la mecánica clásica, conocido el estado actual de un sistema y las fuerzas que actúan sobre él, podremos predecir su evolución futura. Por ejemplo podemos predecir el movimiento de satélites, planetas o asteroides mediante las Leyes de Newton.

Según la mecánica clásica, conocido el estado actual de un sistema y las fuerzas que actúan sobre él, podremos predecir su evolución futura. Por ejemplo podemos predecir el movimiento de satélites, planetas o asteroides mediante las Leyes de Newton.
Pero las leyes clásicas no pueden aplicarse al universo cuántico. Al aceptar la dualidad onda-corpúsculo de una partícula tenemos que aceptar también un principio de indeterminación denominado **principio de incertidumbre o principio de indeterminación**, enunciado en 1927 por Werner Heisenberg (1901 – 1976).

Werner Heisenberg (1901 – 1976)

No es posible determinar simultáneamente con precisión absoluta, la posición y la cantidad de movimiento de una partícula.

Esto significa que si conocemos con bastante precisión la posición de una partícula, tendremos menos precisión en la determinación de su velocidad y viceversa.
Esta imposibilidad no se debe a limitaciones de carácter técnico de los aparatos de medida, sino que es un principio fundamental del universo.
Si el movimiento tiene lugar en el eje X y si llamamos Δx y Δp a las imprecisiones absolutas en la posición y la cantidad de movimiento, el principio de incertidumbre se puede concretar en la expresión matemática:

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

El producto de las imprecisiones en la medida de la posición y en la medida de la cantidad de movimiento, es siempre mayor o igual que $\frac{h}{2\pi}$

Cuánto más pequeña sea una partícula, más sensible es a posibles perturbaciones, por ejemplo un electrón. Ten en cuenta que para observar una partícula, debemos "verla" de alguna forma. Para ello se necesita iluminarla con luz de pequeña longitud de onda (y por tanto de gran frecuencia). Esto implica fotones con cada vez más energía, que rebotarán en la partícula y luego llegan a nuestro ojo, al microscopio o al instrumento empleado. Pero al interaccionar con la partícula la luz altera su velocidad. Así sabremos su posición, pero su velocidad la conoceremos con más imprecisión. Para el caso del mundo macroscópico, el principio de incertidumbre sigue vigente, pero al iluminar cualquier objeto, la imprecisión en la velocidad que se produce es tan pequeña que el efecto es perfectamente despreciable, por ello podemos conocer simultáneamente la posición y velocidad de por ejemplo una pelota de fútbol con precisión prácticamente absoluta. Si la constante de Planck tuviese un valor mucho mayor, los efectos cuánticos se notarían sobre cuerpos de más masa.

El principio de incertidumbre nos impide hablar de órbita de un electrón en un átomo. Ahora no podemos conocer con precisión donde se encuentra el electrón en el átomo. Por tanto solamente podemos hablar de zonas donde existe una probabilidad elevada de que el electrón se encuentre ahí.

El principio de incertidumbre no es únicamente aplicable a la posición y la cantidad de movimiento. También se puede aplicar a cualquier pareja de magnitudes cuyo producto sea igual o equivalente al producto energía · tiempo. Por ejemplo, podemos aplicarlo para la energía y el tiempo.

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

7.4.- La ecuación de ondas de Schrödinger.

Schrödinger propuso estudiar el electrón no como una partícula, sino, aceptando la dualidad onda-corpúsculo de De Broglie, describir al electrón mediante una expresión matemática semejante a la de un movimiento ondulatorio.

Dicha expresión denominada **función de onda ψ(r,t)** es la que nos va a permitir describir el comportamiento del electrón.
Dicha función debe cumplir la llamada ecuación de Schrödinger:

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - E_p)\Psi(x) = 0$$

Erwin Schrödinger (1887-1961)

La función de ondas no representa en ningún momento la posición exacta del electrón, sino que tiene un carácter probabilístico. El movimiento del electrón tampoco se describe ahora con una órbita, sino que se describe mediante la ecuación de una onda que envuelve al núcleo. De hecho, el cuadrado de la función de onda está relacionado con la probabilidad de encontrar al electrón en un determinado volumen alrededor del átomo.

Como puedes observar esto supone una concepción radicalmente distinta al modelo clásico de la materia. En la mecánica clásica, las magnitudes tienen unos valores definidos que se pueden medir. En cambio, la mecánica cuántica trabaja más con probabilidades. Por ejemplo, según la mecánica clásica el electrón de un átomo de hidrógeno en su estado fundamental está situado a 0'53 Å del núcleo; según la mecánica cuántica, esa distancia es sólo la distancia más probable. Si se pudiera realizar un experimento adecuado, se obtendrían diferentes valores, pero el valor estadísticamente más probable sería 0'53 Å.

Ejercicio resuelto

2.- Calcula la longitud de onda de un electrón acelerado por una diferencia de potencial de 1000 voltios. Repite el cálculo para una pelota de 100 g moviéndose a 10 m/s. ¿En qué caso podría detectarse el comportamiento ondulatorio de la partícula? Justifica tu respuesta.
Datos: h = 6,6 $\cdot 10^{-34}$ J·s; m_e = 9,1 $\cdot 10^{-31}$ kg. e = 1,6 $\cdot 10^{-19}$ J.
Solución:
La longitud de onda la podemos calcular mediante la expresión:

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

Donde debemos calcular la cantidad de movimiento del electrón en primer lugar. Para ello, como la cantidad de movimiento del electrón se relaciona mediante la energía cinética mediante la expresión:

$$p = \sqrt{2 . m . E_c}$$

Pero debemos calcular la energía cinética que adquiere el electrón una vez que es acelerado. Para ello, al someterlo a una diferencia de potencial, la energía potencial eléctrica se transforma en energía cinética. La energía cinética adquirida por el electrón la podemos averiguar mediante la expresión:

$\Delta Ec = |e| . (V_A - V_B)$ $\quad$ $Ecf - Eco = |e| . (V_A - V_B)$ Y si la energía cinética inicial era cero:

$$Ecf = e . (V_A - V_B) = 1{,}6 . 10^{-19} . 1000 = 1{,}6 \cdot 10^{-13} \text{ J.}$$

Con lo cual la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 . m . E_c}} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 . 9{,}1 . 10^{-31} . 1{,}6 . 10^{-13}}} = 1{,}22 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Para la pelota, (m = 0,1 kg; v = 10 m/s) la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m . v} = \frac{6{,}6 . 10^{-34}}{0{,}1 . 10} = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

Únicamente podría detectarse el comportamiento ondulatorio de la partícula en el caso de un electrón, puesto que la longitud de onda asociada a la pelota de tenis, es demasiado pequeña.

Para resolver

14.- a) ¿Cuál es la energía cinética de un electrón cuya longitud de onda de De Broglie es de 10^{-9} m? b) Si la diferencia de potencial utilizada para que el electrón adquiera la energía cinética se reduce a la mitad, ¿cómo cambia su longitud de onda asociada? Razona la respuesta.
Datos: $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.
Sol.: a) $Ec = 2{,}39 \cdot 10^{-19}$ J; b) Aumenta; $\lambda' = 1{,}42 \cdot 10^{-9}$ m
15.- Calcula la longitud de onda de De Broglie para un coche de 1000 kg que se mueve con la velocidad de 72 km/h. Sol.: $3{,}3 \cdot 10^{-38}$ m.
16.- Se acelera un protón mediante una diferencia de potencial de 3000 V.
a) Calcule la velocidad del protón y su longitud de onda de De Broglie.
b) Si en lugar de un protón fuera un electrón el que se acelera con la misma diferencia de potencial, ¿tendría la misma energía cinética? ¿Y la misma longitud de onda asociada? Razone sus respuestas.
$m_p = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg ; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.
Sol.: a) $v_p = 7{,}51 \cdot 10^{5}$ $m \cdot s^{-1}$; $\lambda = 5{,}17 \cdot 10^{-13}$ m; b) Si. La misma E_c y menor λ ($2{,}23 \cdot 10^{-11}$ m)
17.- En el microscopio electrónico la radiación que se utiliza es un haz de electrones acelerados mediante un campo debido a un potencial eléctrico. El proceso de formación de la imagen es análogo al que tiene lugar en un microscopio ordinario, sustituyendo las lentes de vidrio por lentes magnéticas.
Una lente magnética es esencialmente una bobina por la que circula una corriente eléctrica; al atravesar los electrones esta bobina, pueden ser enfocados sobre un punto debido a la fuerza que el campo magnético creado por la bobina ejerce sobre ellos.
Calcula la longitud de onda del haz de electrones de un microscopio electrónico si la diferencia de potencial que los acelera es de 15000 V. Datos: $me = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg; $e = 1{,}603 \cdot 10^{-19}$ C. Sol.: 0,1 Å.
18.-
a) En un microscopio electrónico se aplica una diferencia de potencial de 20 kV para acelerar los electrones. Determine la longitud de onda de los fotones de rayos X de igual energía que dichos electrones.
b) Un electrón y un neutrón tienen igual longitud de onda de de Broglie. Razone cuál de ellos tiene mayor energía.
Datos: $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1} ; $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1{,}6 \cdot 1^{-19}$ C ; $m_e = 9{,}1 \cdot 1^{-31}$ kg ; $m_n = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg

Sol.: a) $\lambda_x = 6{,}19 \cdot 10^{-11}$ m; b) La Ec viene dada por $Ec = \frac{h^2}{2\lambda^2 m}$. El electrón por tener menor masa.

19.- a) Cuál es la energía de un fotón cuya cantidad de movimiento es la misma que la de un neutrón de energía 4 eV.
b) ¿Cómo variaría la longitud de onda asociada al neutrón si se duplicase su energía?
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1} ; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m_n = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg
Sol.: a) $E = 1{,}4 \cdot 10^{-14}$ J; b) Se hace $\sqrt{2}$ veces menor.

EJERCICIOS DE SELECTIVIDAD PROPUESTOS EN ANDALUCÍA.

a.- Cuestiones.

20.- a) Describa la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico y relaciónela con el principio de conservación de la energía.
b) Suponga un metal sobre el que incide radiación electromagnética produciendo efecto fotoeléctrico. ¿Por qué al aumentar la intensidad de la radiación incidente no aumenta la energía cinética de los electrones emitidos?
21.- Al iluminar una superficie metálica con luz de frecuencia creciente empieza a emitir fotoelectrones cuando la frecuencia corresponde al color amarillo.
a) Explique razonadamente qué se puede esperar cuando el mismo material se irradie con luz roja. ¿Y si se irradia con luz azul?
b) Razone si cabría esperar un cambio en la intensidad de la corriente de fotoelectrones al variar la frecuencia de la luz, si se mantiene constante el número de fotones incidentes por unidad de tiempo y de superficie.
22.- a) Enuncie la hipótesis de De Broglie. Comente el significado físico y las implicaciones de la dualidad onda-corpúsculo.
b) Un mesón tiene una masa 275 veces mayor que un electrón. ¿Tendrían la misma longitud de onda si viajasen a la misma velocidad? Razone la respuesta.
23.- Un protón y un electrón se mueven con la misma velocidad.
a) Explique cuál de los dos tiene una longitud de onda asociada mayor.
b) Razone cuál de ellos tendría una longitud de onda mayor si ambos tuvieran la misma energía cinética.
24.- a) ¿Es cierto que las ondas se comportan también como corpúsculos en movimiento?
Justifique su respuesta.
b) Comente la siguiente frase: "Sería posible medir simultáneamente la posición de un electrón y su cantidad de movimiento, con tanta exactitud como quisiéramos, si dispusiéramos de instrumentos suficientemente precisos"
25.- a) Un átomo que absorbe un fotón se encuentra en un estado excitado. Explique qué cambios han ocurrido en el átomo. ¿Es estable ese estado excitado del átomo?
b) ¿Por qué en el espectro emitido por los átomos sólo aparecen ciertas frecuencias?
¿Qué indica la energía de los fotones emitidos?
26.- a) Enuncie el principio de incertidumbre y explique cuál es su origen.
b) Razone por qué no tenemos en cuenta el principio de incertidumbre en el estudio de los fenómenos ordinarios.
27.- a) ¿Qué entiende por dualidad onda-corpúsculo?
b) Un protón y un electrón tienen la misma velocidad. ¿Son iguales las longitudes de onda de De Broglie de ambas partículas? Razone la respuesta.
28.- Los fenómenos relacionados con una pelota de tenis se suelen describir considerándola como

una partícula. ¿Se podría tratar como una onda? Razone la respuesta.

b.- Problemas.

29.- Un haz de luz de longitud de onda $546 \cdot 10^{-9}$ m penetra en una célula fotoeléctrica de cátodo de cesio, cuyo trabajo de extracción es de 2 eV:
a) Explique las transformaciones energéticas en el proceso de fotoemisión.
b) Calcule la energía cinética máxima de los electrones emitidos. ¿Qué ocurriría si la longitud de onda incidente en la célula fotoeléctrica fuera el doble de la anterior?
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}.
30.- Al estudiar experimentalmente el efecto fotoeléctrico en un metal se observa que la mínima frecuencia a la que se produce dicho efecto es de $1{,}03 \cdot 10^{15}$ Hz.
a) Calcule el trabajo de extracción del metal y el potencial de frenado de los electrones emitidos si incide en la superficie del metal una radiación de frecuencia $1{,}8 \cdot 10^{15}$ Hz.
b) ¿Se produciría efecto fotoeléctrico si la intensidad de la radiación incidente fuera el doble y su frecuencia la mitad que en el apartado anterior? Razone la respuesta.
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.
31.- Un haz de luz de longitud de onda $477 \cdot 10^{-9}$ m incide sobre una célula fotoeléctrica de cátodo de potasio, cuya frecuencia umbral es $5{,}5 \cdot 10^{14}$ s^{-1}.
a) Explique las transformaciones energéticas en el proceso de fotoemisión y calcule la energía cinética máxima de los electrones emitidos.
b) Razone si se produciría efecto fotoeléctrico al incidir radiación infrarroja sobre la célula anterior. (La región infrarroja comprende longitudes de onda entre 10^{-3} m y $7{,}8 \cdot 10^{-5}$ m).
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}.
32.- Un haz de electrones se acelera, desde el reposo, mediante una diferencia de potencial de 10^{4} V.
a) Haga un análisis energético del proceso y calcule la longitud de onda asociada a los electrones tras ser acelerados, indicando las leyes físicas en que se basa.
b) Repita el apartado anterior, si en lugar de electrones, aceleramos protones, en las mismas condiciones.
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $m_p = 1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg.
33.- Una lámina metálica comienza a emitir electrones al incidir sobre ella radiación de longitud de onda $5 \cdot 10^{-7}$ m.
a) Calcule con qué velocidad saldrán emitidos los electrones si la radiación que incide sobre la lámina tiene una longitud de onda de $4 \cdot 10^{-7}$ m.
b) Razone, indicando las leyes en que se basa, qué sucedería si la frecuencia de la radiación incidente fuera de $4{,}5 \cdot 10^{14}$ s^{-1}.
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1} ; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg

EJERCICIOS DE REPASO (todos ').

1.- Un fotón posee una longitud de onda igual a $2{,}0 \cdot 10^{-11}$ m. Calcula la cantidad de movimiento y la energía que tiene. Datos: $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}.
Sol.: $E = 9{,}945 \cdot 10^{-15}$ J; $p = 3{,}3 \cdot 10^{-23}$ kg·m·s^{-1}.
2.- Se dispone de luz monocromática capaz de extraer electrones de un metal. A medida que crece la longitud de onda de la luz incidente:
a.- Los electrones emitidos son más energéticos.
b.- Los electrones emitidos son menos energéticos.
c.- La luz monocromática no es capaz de extraer electrones.

Justifica su veracidad o falsedad.
Sol.: a) F; b) V; c) F.

3.- Se ilumina una superficie de potasio con una luz cuya longitud de onda es $5\cdot10^{-7}$ m. Si la energía necesaria para arrancar un electrón es 2 eV, ¿Cuál será la energía que corresponde a los electrones arrancados? Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}. Sol.: 0,49 eV.

4.- Un fotón, de longitud de onda $8\cdot10^{-8}$ m, incide sobre una pieza de potasio, cuya energía umbral de extracción es de 2 eV. ¿Logrará arrancar algún electrón?. Si la respuesta es positiva, indica la energía cinética máxima que puede adquirir el electrón. Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}. Sol.: 13,53 eV.

5.- Una radiación umbral que permite el funcionamiento de una célula fotoeléctrica posee una longitud de onda de 400 nm. ¿Qué velocidad poseerán los electrones arrancados, si la célula se ilumina con una radiación de 500 nm?)Y si se ilumina con luz de 300 nm?. Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}. Sol.: En el primer caso no se arrancan; $6,02\cdot10^{5}$ m/s.

6.- Si f_o es la frecuencia umbral de un metal puro, el efecto fotoeléctrico sólo se presenta si:
a) $\lambda < \lambda_o$; b) $f < f_o$; c) $f = \upsilon_o$. Indica si es verdadero o falso.
Sol.: a y c) verdadero; b) falso.

7.- La emisión de fotoelectrones en una célula depende de:
a.- De la intensidad de la luz incidente.
b.- De la frecuencia de la luz incidente.
c.- De la distancia entre electrodos.
d.- De la naturaleza de la célula.
Indica la/s respuesta/s verdadera/s.
Sol.: b)

8.- Sobre una superficie de potasio situada en el vacío incide luz amarilla ($\lambda = 5,89\cdot10^{-7}$ m), produciendo emisión fotoeléctrica. 1) ¿Qué trabajo se requiere para arrancar un electrón de la capa más externa? 2) ¿Qué energía cinética tienen los electrones expulsados de la superficie del potasio? 3) ¿Cuál será su velocidad? Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}. Longitud de onda umbral para el potasio 710 nm. Sol.: $2,80.10^{-17}$ J; $057\cdot10^{-17}$ J; $3,54\cdot10^{6}$ ms^{-1}.

9.- Para poner mejor de relieve el efecto fotoeléctrico (desprendimiento de electrones de la superficie de un metal) se observa que es preferible hacer incidir sobre el metal luz U.V. ($\lambda = 4\cdot10^{-7}$ m) que luz roja ($\lambda = 7\cdot10^{-7}$ m). ¿Sabes por qué?
Sol.: Al tener mayor frecuencia, tiene mayor energía y se producirá con más probabilidad el efecto fotoeléctrico. Además, los fotoelectrones salen con mayor energía.

10.- La función trabajo (también denominada trabajo de extracción) para el sodio, es de 2,5 eV. Calcula:
a.- La frecuencia umbral.
b.- La longitud de onda de la luz incidente para que se produzca el efecto fotoeléctrico en dicho metal.
Datos: $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}; $h = 6,6\cdot10^{-34}$ J·s; 1 eV = $1,6\cdot10^{-19}$ J.
Sol.: a) $f_o = 6,06\cdot10^{14}$ Hz; b) $\lambda_o = 4,95\cdot10^{-7}$ m.

11.- Se ilumina un metal cuyo trabajo de extracción es $3\cdot10^{-19}$ J, con luz visible de longitud de onda $5\cdot10^{-7}$ m. ¿Cuál es su frecuencia umbral? Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J s ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}.
Sol.: $4.527\cdot10^{14}$ Hz.

12.- Sobre una lámina se hace incidir luz U.V. de longitud de onda 1000 Å. Calcula la velocidad de los electrones que se desprenden del metal, sabiendo que la energía de ionización o trabajo de extracción del material es de 10^{-18} J. Datos: $h = 6,62\cdot10^{-34}$ J·s; $c = 3\cdot10^{8}$ m/s; $m_e = 9,31\cdot10^{-31}$ kg. Sol.: $1,463\cdot10^{6}$ m/s.

13.- Al iluminar un metal con luz monocromática de frecuencia $f = 1,1\cdot10^{15}$ Hz se observa que la energía cinética máxima de los electrones emitidos es de 2 eV. Calcula:
a.- La frecuencia umbral para que se produzca el efecto fotoeléctrico.

b.- La frecuencia de la luz con que hay que iluminar para que la energía máxima de los electrones sea superior en un 25 % a la del caso anterior.

Dato: $h = 6{,}62\cdot10^{-34}$ J·s. Sol.: a) $f_o = 6{,}16\cdot10^{14}$ Hz; b) $f = 1{,}22\cdot10^{15}$ Hz.

14.- Si la frecuencia umbral para un metal es de $5\cdot10^{14}$ Hz y la radiación utilizada tiene una frecuencia de $1{,}2\cdot10^{15}$ ciclos·s^{-1}, ¿Qué energía cinética llevará el electrón arrancado? ¿Cuál será su velocidad? Masa del electrón = $9{,}11\cdot10^{-31}$ kg.

Sol.: $46{,}4\cdot10^{-20}$ J; $10{,}09\cdot10^{5}$ ms^{-1}

15.- Una lámina de plata (λ_o = 264 nm) se ilumina con luz ultravioleta λ = 181 nm. Calcula: 1) Función de trabajo del metal (energía mínima necesaria para liberar un electrón de la plata). 2) Energía transportada por cada fotón incidente. 4) Velocidad con que salen los electrones emitidos. Datos: $h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ J s ; $c = 3\cdot10^{8}$ m s^{-1}. Sol.: $7{,}53\cdot10^{-12}$ J; $10{,}99\cdot10^{-12}$ J; $0{,}27\cdot10^{10}$ ms^{-1}.

16.- Calcula la longitud de onda de De Broglie de un electrón de energía cinética de 40 eV. (masa de electrón = $9{,}11\cdot10^{-31}$ kg). Sol.: 1,94 Å.

17.- Calcula la longitud de onda asociada a un electrón de 100 eV de energía cinética. Dato: $h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ J s. Sol.: 1,23Å.

18.- Calcula la longitud de onda de De Broglie que corresponde a un balón de fútbol que se mueve a 25 m/s, si su masa es de 450 g. Calcula, asimismo, la que corresponde a un tren de 1000 toneladas de masa, si se mueve con una velocidad de 144 km/h. Dato: $h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ J s.

Sol.: balón : $5{,}89\cdot10^{-35}$ m; tren: $1{,}66\cdot10^{-41}$ m.

19.- Un electrón y un fotón poseen ambos una longitud de onda de $2{,}0\cdot10^{-10}$ m. Calcula la cantidad de movimiento y la energía asociados a ambos. Dato: $h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ J s.

Sol.: $3{,}3\cdot10^{-24}$ kg·m/s para ambos; 38 eV el electrón y 6200 eV el fotón.

20.- En un conductor metálico, los electrones se mueven con una velocidad de 10^{-2} cm/s. Según la hipótesis de De Broglie, ¿cuál será la longitud de onda asociada a estos electrones? Datos: Masa del electrón: $m_e = 9{,}109\cdot10^{-31}$ kg; $h = 6{,}626\cdot10^{-34}$ J·s.

Sol.: λ = 7,274 m.

21.- Calcula la longitud de onda de De Broglie asociada a una pelota de 10 g de masa que se mueve a la velocidad de 10 m/s. Compara el valor obtenido con el orden de magnitud de la longitud de onda para la radiación visible. Dato: $h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ J s

Sol.: $\lambda = 6{,}6256\cdot10^{-35}$ m.