CUESTIONES Y PROBLEMAS SOBRE FÍSICA CUÁNTICA

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 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 $4\cdot10^{-19}$ J para una radiación incidente de $3{,}5\cdot10^{-7}$ m de longitud de onda. Calcule: i) El trabajo de extracción de un electrón individual y de un mol de electrones, en julios. ii) La diferencia de potencial mínima para frenar los electrones emitidos.

$e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ C; $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ J s ; $c = 3\cdot10^{8}$ m s^{-1}; $N_A = 6{,}02\cdot10^{23}$ mol^{-1}

a) i) En el efecto fotoeléctrico, se producirá emisión de electrones si la energía de los fotones incidentes es **superior** al trabajo de extracción del metal (y eso marca la frecuencia umbral f_0 y la longitud de onda umbral, λ_0). La energía de los fotones es $E_{fot} = h\cdot f = \frac{hc}{\lambda}$. Vemos que a mayor longitud de onda, menor es la energía de los fotones. Es imposible que si λ es mayor que el valor "mínimo" (λ_0), la radiación tenga energía para arrancar electrones al metal. La longitud de onda umbral no es un valor mínimo, es un valor **máximo**, y λ de la radiación debe ser **menor** que λ_0. La afirmación es falsa. Sería correcta si hablara de frecuencia, y no de longitud de onda.

ii) Al incidir los fotones, si su energía es superior al trabajo de extracción, la energía sobrante se invierte en energía cinética de los electrones emitidos, de forma que $Ec_e = E_{fot} - W_{extr}$. El trabajo de extracción es una característica propia del metal, por lo que la energía cinética máxima de los electrones sí depende del metal. La afirmación es falsa.

iii) Una mayor intensidad de radiación significa un mayor número de fotones incidentes, pero no una mayor energía de cada fotón. Basándonos nuevamente en la expresión $Ec_e = E_{fot} - W_{extr}$, vemos que ni la energía de los fotones, ni el trabajo de extracción (que depende exclusivamente del metal), dependen de la intensidad de la radiación incidente. La afirmación es verdadera.

b) Según la explicación que Albert Einstein dio al efecto fotoeléctrico, la luz se comporta en ese experimento como partículas (fotones) que al incidir ceden su energía a los electrones del metal. Si esta energía es inferior a la energía necesaria para extraer al electrón, no se producirá emisión y el fotón será reflejado. Si es superior, la energía sobrante se invierte en energía cinética de los electrones emitidos, de forma que $Ec_e = E_{fot} - W_{extr}$

i) Datos: $Ec_e = 4\cdot10^{-19}\,J$

Radiación: $\lambda = 3{,}5\cdot10^{-7}$ m → $E_{fot} = h\cdot f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63\cdot10^{-34}Js\cdot3\cdot10^{8}ms^{-1}}{3{,}5\cdot10^{-7}m} = 5{,}68\cdot10^{-19}\,J$

Así, $Ec_e = E_{fot} - W_{extr} \rightarrow W_{extr} = E_{fot} - Ec_e = 5{,}68\cdot10^{-19}\,J - 4\cdot10^{-19}\,J = 1{,}68\cdot10^{-19}\,J$

El trabajo de extracción es de $1{,}68\cdot10^{-19}$ J por cada electrón emitido.

Para 1 mol de electrones emitidos: $\frac{1{,}68\cdot10^{-19}\,J}{1\,electrón}\cdot\frac{6{,}02\cdot10^{23}\,electrones}{1\,mol} = 1{,}01136\cdot10^{5}\,J\,mol^{-1}$

El trabajo necesario para extraer 1 mol de electrones es $1{,}01136\cdot10^{5}\,J$

ii) La diferencia de potencial necesaria para frenar los electrones es el potencial de frenado

$$V_{fr} = \frac{Ec_e}{e} = \frac{4\cdot10^{-19}\,J}{1{,}6\cdot10^{-19}\,C} = 2{,}5\,V$$

2022. Julio

D) FÍSICA DEL SIGLO XX

D1. a) Dos partículas distintas 1 y 2 tienen la misma longitud de onda de De Broglie. Si $m_1 = 2\,m_2$, calcule razonadamente: i) la relación entre sus velocidades y ii) la relación entre sus energías cinéticas.

b) Un coche de 2000 kg de masa y un átomo de helio ($^4_2\mathrm{He}$) se mueven a 20 m s^{-1}. i) Calcule la longitud de onda de De Broglie del coche y del átomo de helio. ii) Si un instrumento de laboratorio sólo puede medir longitudes de onda mayores a $5\cdot10^{-11}$ m, comente razonadamente si es posible medir la longitud de la onda de De Broglie del coche y del átomo de helio.

m($^4_2\mathrm{He}$) = 4,002603 u; 1u = 1,66 ·10^{-27} kg; h = 6,63·10^{-34} J s

a) Según de Broglie, toda partícula puede comportarse como onda en determinados experimentos. La longitud de onda asociada $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

$m_1 = 2 m_2$
$\lambda_1 = \lambda_2$

i) $\frac{h}{m_1 v_1} = \frac{h}{m_2 v_2} \rightarrow \frac{\cancel{h}}{2\cancel{m_2} \cdot v_1} = \frac{\cancel{h}}{\cancel{m_2} v_2} \rightarrow \underline{v_2 = 2 \cdot v_1}$

ii) $E_{c_1} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$

$E_{c_2} = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1}{2} \cdot (2v_1)^2 = \frac{1}{2}\, 2 m_1 v_1^2 = 2 E_{c_1}$

$\underline{E_{c_2} = 2 E_{c_1}}$

b) Coche $m = 2000$ kg   Hipótesis de Broglie: Ver apdo a)

i) $\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6'63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s}{2000\ kg \cdot 20\ ms^{-1}} = 1'6575 \cdot 10^{-38}\ m$

Átomo de ^4_2He $m = 4'002603\ \cancel{u} \cdot \frac{1'66 \cdot 10^{-27}\ kg}{1\ \cancel{u}} = 6'6443 \cdot 10^{-27}\ kg$

$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6'63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s}{6{,}6443 \cdot 10^{-27}\ kg \cdot 20\ ms^{-1}} = 5'145 \cdot 10^{-9}\ m$

ii) Como el aparato sólo puede medir $\lambda > 5 \cdot 10^{-11}$ m, podrá medir la λ del átomo de He

$5'145 \cdot 10^{-9}\ m > 5 \cdot 10^{-11}\ m$.

Pero no podrá medir la del coche

$1'6575 \cdot 10^{-38}\ m \ll 5 \cdot 10^{-11}\ m$.

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 238U posee una energía cinética de 6,72·10^{-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 = 6,63·10^{-34} J s; m$_α$ = 6,64 ·10^{-27} kg; e = 1,6·10^{-19} C**

a) Louis De Broglie propuso en 1924 que, del mismo modo que la luz se comporta como onda o como partícula según el experimento, también la materia presenta este carácter dual. Toda partícula puede comportarse como una onda en determinadas experiencias. La onda de materia asociada a la partícula se caracteriza por su longitud de onda, dada por $\lambda = \frac{h}{p}$, donde · h es la constante de Planck, (h = 6,63 ·10^{-34} J·s)
· p es la cantidad de movimiento (unidades: kg m s^{-1})
· λ es la longitud de onda asociada (unidades: m)

(La expresión también puede ponerse como $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ y aquí, la masa se mide en kg, y la velocidad en m s^{-1})

b) Datos: partícula α. ($^4_2He^{2+}$, 2 protones y 2 neutrones) m = 6,64 ·10^{-27} kg; q = 2·e = 3,2 ·10^{-19} C

i) Aplicando la expresión de De Broglie: $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

Calculamos la velocidad a partir de la energía cinética: $Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot Ec}{m}} = 1{,}423 \cdot 10^7 \ ms^{-1}$

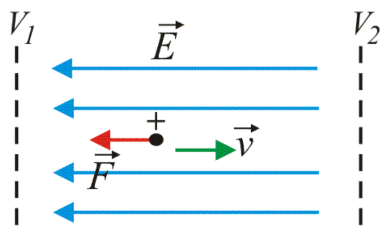
Sustituimos: $\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = 7{,}0168 \cdot 10^{-15} \ m$

ii) Teniendo en cuenta que la partícula tiene carga positiva, para frenarla debemos aplicar un campo eléctrico en sentido contrario al del movimiento, de este modo la fuerza eléctrica $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$, se opondrá al movimiento y lo frenará.
Sólo actúa la fuerza eléctrica, que es conservativa, por lo que la energía mecánica se mantiene constante.

$E_M = cte \rightarrow \Delta Ec = - \Delta Ep_e \rightarrow \Delta Ec = -q \cdot \Delta V \rightarrow 0 - Ec_1 = -q \cdot (V_2 - V_1) \rightarrow V_2 - V_1 = \frac{Ec_1}{q}$

Sustituimos: $Ec_1 = 6{,}72 \cdot 10^{-13}$ J; $q = 2 \cdot e = 3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C $\qquad V_2 - V_1 = 2{,}1 \cdot 10^6$ V (2,1 MV)

Vemos que, para conseguir frenar la partícula, V$_2$ > V$_1$, con lo que el campo eléctrico, que va en el sentido del potencial decreciente, debe ir en sentido opuesto al del movimiento, como ya habíamos comentado.



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 2,8·10^{-10} m. Calcule razonadamente: i) La velocidad con la que se mueve el electrón. ii) La energía cinética que posee.
m$_e$ = 9,1·10^{-31} kg; h = 6,63·10^{-34} J s

a) Electrón y protón tienen cargas iguales en valor absoluto, pero de signo contrario. $|q_p| = |q_e| = e$
Al acelerar una partícula cargada desde el reposo mediante un campo eléctrico, que es conservativo, la energía mecánica se mantiene constante. $E_M = cte \rightarrow \Delta Ec = - \Delta Ep_e \rightarrow \Delta Ec = -q \cdot \Delta V \rightarrow Ec = |q| \cdot \Delta V = e \cdot \Delta V$

Y la velocidad $Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot Ec}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \Delta V}{m}}$

ii) Vemos que la velocidad de la partícula depende de la masa. Como la masa del protón es mayor que la del electrón, su velocidad será menor $v_p < v_e$, por lo que la afirmación es falsa.

i) Según la hipótesis de De Broglie, toda partícula puede comportarse como onda en determinados experimentos. La onda de materia asociada a la partícula se caracteriza por su longitud de onda, dada por $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$, donde h es la constante de Planck, m la masa de la partícula, y v su velocidad.

$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{m \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot \Delta V}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{m^{\cancel{2}} \cdot 2 \cdot e \cdot \Delta V}{\cancel{m}}}} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot \Delta V}}$ Vemos que, a mayor masa de la partícula, su longitud de onda asociada es menor, por lo que $\lambda_p < \lambda_e$. La afirmación es falsa.

b) i) Aplicando la hipótesis de De Broglie, ya explicada en el apartado a),

$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \rightarrow v = \frac{h}{m \cdot \lambda} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-10} \text{ m}} = 2{,}602 \cdot 10^{6}\ ms^{-1}$ (velocidad)

ii) La energía cinética de la partícula $Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} kg \cdot (2{,}602 \cdot 10^{6}\ ms^{-1})^2 = 3{,}08 \cdot 10^{-18}\ J$

Julio 2020. 4

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 .10^{-27} kg; h = 6,63 ·10^{-34} J S; e = 1,6 -10^{-19} C

a)

Según la hipótesis de De Broglie, toda partícula puede comportarse como onda en determinados experimentos. La onda de materia asociada a la partícula se caracteriza por su longitud de onda, dada por $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$, donde h es la constante de Planck, m la masa de la partícula, y v su velocidad.

Si ambas partículas tienen asociada la misma longitud de onda $\lambda_1 = \lambda_1 \rightarrow \frac{h}{m_1 \cdot v_1} = \frac{h}{m_2 \cdot v_2} \rightarrow \frac{m_2}{m_1} = \frac{v_1}{v_2}$

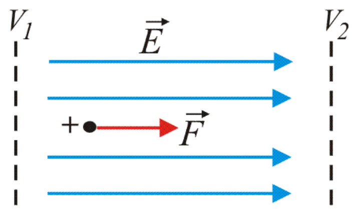
Nos dicen que la energía cinética de la primera es el doble de la segunda

$Ec_1 = 2 \cdot Ec_2 \rightarrow \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 = 2 \cdot \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 \rightarrow \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 = 2 \cdot \frac{m_2}{m_1}$

Combinando ambas ecuaciones $\left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 = 2 \cdot \frac{m_2}{m_1} \rightarrow \frac{m_2}{m_1} = 2 \rightarrow m_2 = 2 \cdot m_1$

b)

Al acelerar el protón desde el reposo aplicando un campo eléctrico, sobre la partícula sólo actúa la fuerza electrostática, que es conservativa, por la que la energía mecánica del protón se mantiene constante.



$E_M = cte \rightarrow \Delta E_M = \Delta Ec + \Delta Ep \rightarrow \Delta Ec = - \Delta Ep_e \rightarrow \Delta Ec = -q \cdot \Delta V$

$Ec_2 - Ec_1 = -q \cdot (V_2 - V_1)$

En este caso: $Ec_1 = 0$, $q = e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, $V_1 > V_2 \rightarrow V_2 - V_1 = -1000$ V

$Ec_2 = 1{,}6 \cdot 10^{-16}$ J, por lo que la velocidad $Ec_2 = \frac{1}{2} m_p \cdot v_2^2 = 1{,}6 \cdot 10^{-16} J \rightarrow v_2 = 4{,}34 \cdot 10^{5}\ m\,s^{-1}$

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, la longitud de onda asociada se calcula

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s}{1{,}7 \cdot 10^{-27} kg \cdot 4{,}34 \cdot 10^{5}\ m\,s^{-1}} = 8{,}99 \cdot 10^{-13}\ m$$

Junio 2019. B. 4

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 fotoelectrones emitidos cuando se ilumina una lámina de silicio con luz ultravioleta de $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ m. $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J s , $c = 3 \cdot 10^{8}$ ms^{-1}

a) La cuestión versa sobre el efecto fotoeléctrico.

Einstein explicó el efecto fotoeléctrico en 1905 suponiendo que la energía de la luz se transmite de forma discreta mediante "paquetes" o "cuantos" de luz (más tarde denominados "fotones"). La energía de un fotón depende de la frecuencia de la radiación ($E_f = h \cdot f$). Al incidir el fotón sobre un electrón del metal, le cede su energía.

Si la energía del fotón es insuficiente para vencer la atracción por parte del núcleo (si E_f es menor que el trabajo de extracción, $\phi_0 = h \cdot f_0$) no se producirá la emisión de electrones.

Si $E_f > \phi_0$, entonces se producirá la emisión de electrones. La energía sobrante se invierte en aumentar la energía cinética de los electrones emitidos.

$$E_f = \Phi_0 + Ec_e \quad \rightarrow \quad Ec_e = h \cdot f - h \cdot f_0$$

Vemos que si la frecuencia de la radiación incidente es inferior a la frecuencia umbral, no se producirá el efecto.

ii) Como vemos en la expresión de la Ec máxima de los fotoelectrones, dicha Ec aumentará al aumentar la frecuencia de la radiación incidente. $Ec_e = h \cdot f - h \cdot f_0$

El número de electrones emitidos no se verá afectado, ya que no aumenta el número de fotones incidentes, sino la energía de cada uno.

iii) Aumentar la intensidad de la radiación significa aumentar el número de fotones incidentes, pero no la energía (frecuencia) de cada uno. Por lo tanto, se emitirán más fotoelectrones, pero con la misma Ec máxima.

b) El dato corresponde a la longitud de onda umbral (λ_0)del silicio, es decir, la longitud de onda máxima que puede tener la radiación incidente para producir efecto fotoeléctrico. Con mayor longitud de onda, los fotones no tendrán energía suficiente para extraer los electrones de sus átomos. Calculamos la frecuencia umbral (frecuencia mínima de la radiación incidente para que se produzca el efecto)

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3 \cdot 10^8\ ms^{-1}}{1{,}09 \cdot 10^{-6}\ m} = 2{,}75 \cdot 10^{14}\ Hz$$

El trabajo de extracción, o función trabajo (ϕ_0), es la energía mínima que debe tener el fotón para que el electrón venza la atracción del núcleo. $\phi_0 = h \cdot f_0 = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J\ s \cdot 2{,}75 \cdot 10^{14}\ s^{-1} = 1{,}82 \cdot 10^{-19}\ J$

Al incidir luz ultravioleta de $\lambda = 2{,}5 \cdot 10^{-7}$ m, la energía de los fotones incidentes será

$$E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J\ s \cdot 3 \cdot 10^8\ ms^{-1}}{2{,}5 \cdot 10^{-7}\ m} = 7{,}96 \cdot 10^{-19}\ J$$

La energía cinética máxima de los fotoelectrones será $Ec_e = E_f - \phi_0 = 6{,}14 \cdot 10^{-19}\ J$ (unos 3,8 eV)

Junio 2018. A. 4.

4. a) Explique la conservación de la energía en el proceso de emisión de electrones por una superficie metálica al ser iluminada con luz adecuada.
b) Los fotoelectrones expulsados de la superficie de un metal por una luz de $4\cdot10^{-7}$ m de longitud de onda en el vacío son frenados por una diferencia de potencial de 0,8 V. ¿Qué diferencia de potencial se requiere para frenar los electrones expulsados de dicho metal por otra luz de $3\cdot10^{-7}$ m de longitud de onda en el vacío? Justifique todas sus respuestas.
$c = 3\cdot10^{8}$ m s^{-1}; $e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ C; $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ J s

a) El proceso al que se refiere la cuestión es el efecto fotoeléctrico, un fenómeno cuántico explicado por Albert Einstein en 1905 en el que se observa el comportamiento corpuscular de la luz en su interacción con la materia.
Según explicó Einstein, la luz viaja en forma de cuantos de radiación (fotones) con energía $E_f = h\cdot f$, donde f es la frecuencia de la luz. Al incidir sobre una superficie metálica, los fotones ceden su energía a los electrones del metal. Si la energía de los fotones es mayor que la necesaria para que los electrones venzan la atracción del núcleo (trabajo de extracción W_{extr}, o función trabajo ϕ_0), se producirá la emisión de electrones por parte del metal. La energía sobrante se invierte en aumentar la energía cinética de los electrones emitidos (Ec_e). Así, podemos hacer este balance energético:

$$E_f = W_{extr} + Ec_e$$

La emisión de electrones se producirá sólo si la energía de los fotones supera al trabajo de extracción, es decir, si su frecuencia está por encima de la frecuencia umbral característica del metal (Es lo que el enunciado indica como "iluminada con la luz adecuada"). De lo contrario no se producirá emisión de electrones y la energía del fotón será de nuevo emitida.

b) Como hemos explicado en el apartado anterior, el balance energético en el efecto fotoeléctrico es
$E_f = W_{extr} + Ec_e$
La energía de los fotones incidentes $E_f = h\cdot f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63\cdot10^{-34} Js \cdot 3\cdot10^{8} ms^{-1}}{4\cdot10^{-7} m} = 4{,}97\cdot10^{-19}\,J$
El potencial de frenado (diferencia de potencial necesaria para frenar los electrones emitidos y que no alcancen el ánodo) está relacionado con la energía cinética máxima de los electrones $Ec_e = e\cdot V_{fr}$
$Ec_e = e\cdot V_{fr} = 1{,}6\cdot10^{-19}\,C\cdot 0{,}8\,V = 1{,}28\cdot10^{-19}\,J$
Y el trabajo de extracción del metal $W_{extr} = E_f - Ec_e = 4{,}97\cdot10^{-19}\,J - 1{,}28\cdot10^{-19}\,J = 3{,}69\cdot10^{-19}\,J$

En la segunda experiencia, como la longitud de onda es menor que en el primer caso, la frecuencia de la radiación y por tanto su energía será mayor, por lo que es seguro que también se producirá el efecto fotoeléctrico.
La energía de la radiación $E_f = h\cdot f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}63\cdot10^{-34} Js\cdot 3\cdot10^{8} ms^{-1}}{3\cdot10^{-7} m} = 6{,}63\cdot10^{-19}\,J$
Como el trabajo de extracción es el mismo, ya que es el mismo metal, ahora la energía cinética de los electrones será
$Ec_e = E_f - W_{extr} = 6{,}63\cdot10^{-19}\,J - 3{,}69\cdot10^{-19}\,J = 2{,}94\cdot10^{-19}\,J$
Calculamos ahora el potencial de frenado $V_{fr} = \frac{Ec_e}{e} = \frac{2{,}94\cdot10^{-19}\,J}{1{,}6\cdot10^{-19}\,C} = 1{,}84\,V$
Lógicamente, obtenemos un resultado mayor, ya que la energía cinética de los fotoelectrones emitidos ha aumentado.

Junio 2018. B. 4

4. a) Explique la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico.
b) Se ilumina la superficie de un metal con dos haces de longitudes de onda $\lambda_1 = 1{,}96\cdot10^{-7}$ m y $\lambda_2 = 2{,}65\cdot10^{-7}$ m. Se observa que la energía cinética de los electrones emitidos con la luz de longitud de onda λ_1 es el doble que la de los emitidos con la de λ_2. Obtenga la energía cinética con que salen los electrones en ambos casos y la función trabajo del metal.
$h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ J s ; $c = 3\cdot10^{8}$ m s^{-1}

a) El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética. La teoría ondulatoria clásica de Maxwell sobre la luz no podía explicar las características de este fenómeno, como la existencia de una frecuencia umbral, al suponer una transmisión continua de la energía.
Einstein aplicó las hipótesis cuánticas de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico. 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" (posteriormente 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 $E_{fotón} = h \cdot f$
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_o). También puede definirse como la energía mínima que debe tener el fotón para extraer un electrón del metal. Así, tendremos que $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal.
Si el fotón no posee energía (frecuencia) suficiente, no podrá arrancar al electrón, y el fotón será emitido de nuevo. Esto explica la existencia de la frecuencia umbral.
Si la energía es superior al trabajo de extracción, la energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$$E_{fotón} = W_{extr} + Ec_e \quad \rightarrow \quad h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

Así, una mayor frecuencia de la radiación significará una mayor energía cinética de los electrones, pero no un mayor nº de electrones emitidos. Y una mayor intensidad de la radiación (mayor nº de fotones) significará un mayor nº de electrones emitidos, pero no una mayor energía cinética.

b) Como se ha explicado en el apartado a, la energía de los fotones incidentes ($E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$) se invierte en vencer la atracción del núcleo y dar energía cinética a los electrones emitidos

$$E_{f1} = W_{extr} + Ec_{e1} \quad \rightarrow \quad \frac{hc}{\lambda_1} = W_{extr} + Ec_{e1} \quad \rightarrow \quad 1{,}01\cdot10^{-18}\ J = W_{extr} + 2\cdot Ec_{e2}$$

$$E_{f2} = W_{extr} + Ec_{e2} \quad \rightarrow \quad \frac{hc}{\lambda_2} = W_{extr} + Ec_{e2} \quad \rightarrow \quad 7{,}59\cdot10^{-19}\ J = W_{extr} + Ec_{e2}$$

$$Ec_{e1} = 2 \cdot Ec_{e2}$$

$Ec_{e2} = 2{,}59 \cdot 10^{-19}$ J

$Ec_{e1} = 2\cdot Ec_{e2} = 5{,}18 \cdot 10^{-19}$ J

Despejando al función trabajo $W_{extr} = 4{,}92\cdot10^{-19}$ J

Junio 2017. B.4

4. a) Enuncie el principio de dualidad onda-corpúsculo. Si un electrón y un neutrón se mueven con la misma velocidad, ¿cuál de los dos tiene asociada una longitud de onda menor?
b) Una lámina metálica comienza a emitir electrones al incidir sobre ella radiación de longitud de onda $2{,}5\cdot10^{-7}$ m. Calcule la velocidad máxima de los fotoelectrones emitidos si la radiación que incide sobre la lámina tiene una longitud de onda de $5\cdot10^{-8}$ m.
$h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ J s; $c = 3\cdot10^{8}$ m s^{-1}; $m_e = 9{,}11\cdot10^{-31}$ kg

a)
La dualidad onda-corpúsculo fue planteada por Louis de Broglie en 1924. Establece que, al igual que la luz tiene comportamiento corpuscular en determinadas experiencias, también las partículas (protones, electrones…) pueden comportarse como ondas. Es decir, la naturaleza tiene carácter dual, y se manifestarán las propiedades de onda o de corpúsculo, dependiendo del experimento y del proceso de medida. La onda asociada a la partícula se denomina onda de materia.
La longitud de onda de la onda de materia asociada a la partícula se calcula con la expresión

$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ donde h es la constante de Planck, m la masa y v la velocidad de la partícula.

Vemos que, si la velocidad de ambas partículas es la misma, la longitud de onda es inversamente proporcional a la masa. El neutrón, al tener mayor masa que el electrón, tendrá una longitud de onda asociada menor.

$\lambda_{neutrón} < \lambda_{electrón}$

b) El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética. Fue explicado por Einstein en 1905 aplicando las hipótesis cuánticas de Planck, y suponiendo que la luz está constituida por partículas, los fotones, que transportan la energía de forma discreta. $E_{fotón} = h \cdot f$
Cuando un fotón incide sobre un electrón del metal, le cede su energía. Si ésta es suficiente para vencer la atracción del núcleo y extraerlo (trabajo de extracción o función trabajo, Φ_0), se producirá la emisión de electrones. En caso contrario, no se producirá. La frecuencia mínima que debe tener la radiación para arrancar los electrones se denomina frecuencia umbral del metal (f_0). Se cumple que $\Phi_0 = h \cdot f_0$
Una vez vencida la atracción del núcleo, la energía sobrante se invierte en dar energía cinética a los electrones.
Así: $E_f = \Phi_0 + Ec_e \rightarrow hf = hf_0 + Ec_e \rightarrow Ec_e = h\cdot(f - f_0)$

La cuestión nos da el dato de la longitud de onda umbral λ_0 (longitud de onda máxima de la radiación para que se produzca el efecto fotoeléctrico. Calculamos la frecuencia umbral

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3\cdot10^8\ \mathrm{ms^{-1}}}{2{,}5\cdot10^{-7}\ \mathrm{m}} = 1{,}2\cdot10^{15}\ Hz$$

La frecuencia de la radiación $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\cdot10^8\ \mathrm{ms^{-1}}}{5\cdot10^{-8}\ \mathrm{m}} = 6\cdot10^{15}\ Hz$

Y la energía cinética máxima de los electrones

$$Ec_e = hf - hf_0 = 6{,}63\cdot10^{-34}\ J\cdot s\cdot\left(6\cdot10^{15}\ s^{-1} - 1{,}2\cdot10^{15}\ s^{-1}\right) = 3{,}18\cdot10^{-18}\ J$$

La velocidad máxima de los electrones emitidos es $v_e = \sqrt{\frac{2\cdot Ec_e}{m_e}} = 2{,}64\cdot10^{6}\ m\cdot s^{-1}$

Junio 2016. B. 2

2. a) Teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico. Concepto de fotón.
b) Un haz de luz provoca efecto fotoeléctrico en un determinado metal. Explique cómo se modifica el número de fotoelectrones y su energía cinética máxima si: i) aumenta la intensidad del haz luminoso, ii) aumenta la frecuencia de la luz incidente, iii) disminuye la frecuencia por debajo de la frecuencia umbral del metal.

a) El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética. La teoría ondulatoria clásica de Maxwell sobre la luz no podía explicar las características de este fenómeno, como la existencia de una frecuencia umbral, al suponer una transmisión continua de la energía.

Einstein aplicó las hipótesis cuánticas de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico. 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" (posteriormente 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 $E_{fotón} = h \cdot f$

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_o). También puede definirse como la energía mínima que debe tener el fotón para extraer un electrón del metal. Así, tendremos que $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal.

Si el fotón no posee energía (frecuencia) suficiente, no podrá arrancar al electrón, y el fotón será emitido de nuevo. Esto explica la existencia de la frecuencia umbral.

Si la energía es superior al trabajo de extracción, la energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$$E_{fotón} = W_{extr} + Ec_e \quad \rightarrow \quad h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m v^2$$

Así, una mayor frecuencia de la radiación significará una mayor energía cinética de los electrones, pero no un mayor nº de electrones emitidos. Y una mayor intensidad de la radiación (mayor nº de fotones) significará un mayor nº de electrones emitidos, pero no una mayor energía cinética.

b) Como hemos visto, el efecto fotoeléctrico se explica por la interacción de los fotones con los electrones. Si tiene energía suficiente (es decir, si su frecuencia está por encima de la frecuencia umbral), cada fotón hará que se desprenda un electrón del metal. Una mayor energía (mayor frecuencia) de los fotones hará que éstos salgan con mayor energía cinética máxima, pero no variará su número.

Teniendo en cuenta esto, razonamos las cuestiones planteadas:

i) Al aumentar la intensidad del haz luminoso, aumentamos el número de fotones que inciden sobre el metal, con lo que, dado que se produce el efecto fotoeléctrico, aumentará el número de electrones emitidos, pero no su energía cinética, que depende exclusivamente de la frecuencia de la radiación, que sigue siendo la misma.

ii) Al aumentar la frecuencia de la luz incidente, aumentamos la energía de los fotones, pero no su número. Por lo tanto, el numero de electrones emitidos será el mismo, pero saldrán con mayor energía cinética.

iii) Si la frecuencia de la radiación incidente es menor que la frecuencia umbral del metal, no se producirá el efecto fotoeléctrico, no se desprenderá ningún electrón del metal, ya que la energía de los fotones es menor que el trabajo de extracción del metal y, por tanto, insuficiente para que venzan la atracción del núcleo.

Junio 2015. B.2

2. a) Explique la hipótesis de de Broglie.
b) Un protón y un electrón tienen energías cinéticas iguales, ¿cuál de ellos tiene mayor longitud de onda de de Broglie? ¿Y si ambos se desplazaran a la misma velocidad? Razone las respuestas.

a) El científico francés **Louis de Broglie**, basándose en los resultados de Planck, Einstein y otros (referentes al carácter dual de la luz), 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 onda-partícula.

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**.

Implicaciones: Es posible (y se ha comprobado) observar fenómenos característicos de las ondas, como interferencias, difracción, ondas estacionarias, en partículas como los electrones. Por ejemplo, el estudio cuántico del electrón en el átomo se realiza mediante la función de onda de Schrödinger.

En otros experimentos, sin embargo, es necesario considerar sólo el carácter corpuscular (rayos catódicos, efecto fotoeléctrico).

b) La masa del protón es mucho mayor que la del electrón (unas 2000 veces). Si poseen la misma energía cinética, su velocidad será diferente (hacemos aquí un cálculo sin consideraciones relativistas)

$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$ La velocidad del protón será menor que la del electrón.

Sustituyendo en la ecuación de de Broglie, vemos la relación entre las longitudes de onda asociadas

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{m \cdot \sqrt{\frac{2E_c}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{2E_c m^2}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2\,m\,Ec}},$$

Vemos que a mayor masa, la longitud de onda asociada es menor. Tendrá mayor longitud de onda asociada el electrón.

Si la velocidad fuera la misma, aplicamos directamente la ecuación de de Broglie $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

Vemos que a mayor masa, también será menor la longitud de onda de de Broglie. El electrón tendrá mayor longitud de onda asociada.

Junio 2014. A. 4

4. Sobre una superficie de potasio, cuyo trabajo de extracción es 2,29 eV, incide una radiación de 0,2 ·10^{-6} m de longitud de onda.
a) Razone si se produce efecto fotoeléctrico y, en caso afirmativo, calcule la velocidad de los electrones emitidos y la frecuencia umbral del material.
b) Se coloca una placa metálica frente al cátodo. ¿Cuál debe ser la diferencia de potencial entre ella y el cátodo para que no lleguen electrones a la placa?
(h = 6,6·10^{-34} J s ; c = 3·10^{8} m s^{-1} ; e = 1,6 ·10^{-19} C)

a) Nos encontramos ante un problema de efecto fotoeléctrico (emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética). Este fenómeno, que las teorías clásicas no podían explicar suponiendo un carácter ondulatorio para la luz, fue explicado por Einstein en 1905 suponiendo que en la interacción entre radiación y materia la luz adopta carácter de partícula, es decir, la energía de la luz incidente se transmite de forma discreta, concentrada en partículas o "cuantos" de luz, los fotones. La energía de un fotón depende de su frecuencia y viene dada por la expresión $E_f = h \cdot f$, donde h es la constante de Planck (h = 6,6·10 $^{-34}$ J s).

Al incidir sobre los electrones externos del metal, el fotón cede su energía íntegramente al electrón. Para poder extraerlo del metal, esta energía debe ser superior a la necesaria para vencer la atracción del núcleo (trabajo de extracción o función trabajo) $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal.
La energía sobrante se invierte en aportar energía cinética a los electrones.
El balance energético queda $E_f = W_{extr} + Ec_e$

Para que se produzca el efecto fotoeléctrico, la energía de los fotones incidentes debe ser superior al trabajo de extracción del metal.
La energía de un fotón: $E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\, J\, s \cdot 3 \cdot 10^{8}\, ms^{-1}}{0{,}2 \cdot 10^{-6}\, m} = 9{,}9 \cdot 10^{-19}\, J$

Pasamos a julios el trabajo de extracción $W_{extr} = 2{,}29\, eV \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\, J}{1\, eV} = 3{,}664 \cdot 10^{-19}\, J$

Vemos que la energía de los fotones es mayor que el trabajo de extracción, por lo que sí se producirá efecto fotoeléctrico. La energía sobrante será la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

$$Ec_e = E_f - W_{extr} = 9{,}9 \cdot 10^{-19}\, J - 3{,}664 \cdot 10^{-19}\, J = 6{,}236 \cdot 10^{-19}\, J$$

Calculamos la velocidad de los electrones, sin tener en cuenta efectos relativistas

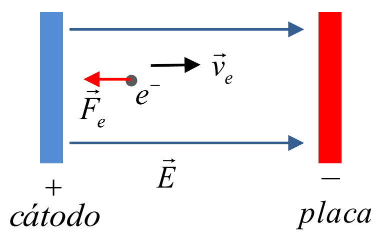
$$Ec_e = \tfrac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 Ec_e}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6{,}236 \cdot 10^{-19}\, J}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\, kg}} = 1{,}17 \cdot 10^{6}\, m\, s^{-1}$$

Y la frecuencia umbral del metal $f_0 = \frac{W_{extr}}{h} = \frac{3{,}664 \cdot 10^{-19}\, J}{6{,}6 \cdot 10^{-34}\, J\, s} = 5{,}55 \cdot 10^{14}\, Hz$

b) La cuestión de este apartado se refiere al concepto de potencial de frenado V_{fr} (diferencia de potencial necesaria para frenar los electrones emitidos, reduciendo a cero su energía cinética y, por consiguiente, impidiendo que alcancen la placa.). el potencial de frenado está relacionado con la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

$$V_{fr} = \frac{Ec_e}{e} = \frac{6{,}236 \cdot 10^{-19}\, J}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\, C} = 3{,}90\, V$$

Para que se produzca el frenado, la placa debe estar a menor potencial que el cátodo, como indica el dibujo.



Junio 2014. B.2

2. a) Teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico.
b) Una superficie metálica emite fotoelectrones cuando se ilumina con luz verde pero no emite con luz amarilla. Razone qué ocurrirá cuando se ilumine con luz azul o con luz roja.

a) El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética. La teoría ondulatoria clásica de Maxwell sobre la luz no podía explicar las características de este fenómeno, como la existencia de una frecuencia umbral, al suponer una transmisión continua de la energía.
Einstein aplicó las hipótesis cuánticas de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico. 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" (posteriormente 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 $E_{fotón} = h \cdot f$
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_o). También puede definirse como la energía mínima que debe tener el fotón para extraer un electrón del metal. Así, tendremos que $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal.
Si el fotón no posee energía (frecuencia) suficiente, no podrá arrancar al electrón, y el fotón será emitido de nuevo. Esto explica la existencia de la frecuencia umbral.
Si la energía es superior al trabajo de extracción, la energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$$E_{fotón} = W_{extr} + Ec_e \quad \rightarrow \quad h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m v^2$$

Así, una mayor frecuencia de la radiación significará una mayor energía cinética de los electrones, pero no un mayor nº de electrones emitidos. Y una mayor intensidad de la radiación (mayor nº de fotones) significará un mayor nº de electrones emitidos, pero no una mayor energía cinética.

b) El color (o tipo) de la radiación viene dado por su frecuencia. Una luz verde tiene mayor frecuencia que la amarilla y, por lo tanto, cada fotón de luz verde tiene mayor energía que un fotón de luz amarilla. Si la luz verde produce la emisión de electrones, es porque su frecuencia es mayor que la frecuencia umbral del metal. Del mismo modo, la frecuencia de la luz amarilla es menor que la frecuencia umbral, y por tanto los fotones no tienen energía suficiente para producir la emisión.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de la luz azul es mayor que la verde (y por tanto, mayor que la umbral), podemos concluir que la luz azul producirá la emisión de fotoelectrones, mientras que la luz roja no, dado que su frecuencia es aún menor que la de la luz amarilla.

Junio 2012. A.2

2. a) Explique la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico y el concepto de fotón.
b) Razone por qua la teoría ondulatoria de la luz no permite explicar el efecto fotoeléctrico.

a) Einstein aplicó las hipótesis de Planck sobre la cuantización de la energía para explicar el efecto fotoeléctrico, es decir, la emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética de una determinada frecuencia (frecuencia umbral) o superior. 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. El fotón sería, pues, la partícula asociada a la onda electromagnética.

Su masa en reposo es nula y su velocidad en el vacío es $c = 3 \cdot 10^8\ ms^{-1}$

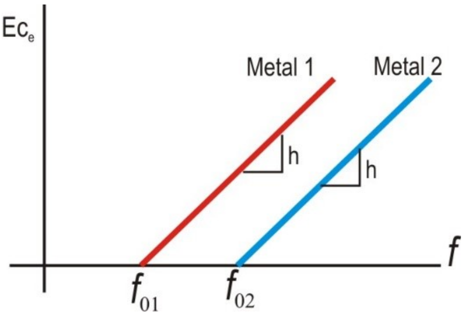
La energía de un fotón viene dada por la expresión de Planck $E_f = h \cdot f$

Su cantidad de movimiento (a partir de la hipótesis de De Broglie) $p = \dfrac{E_f}{c}$

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 $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde υ_0 es la frecuencia umbral característica del metal. (También existe la longitud de onda umbral $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$).
La energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$$E_{fotón} = W_{extr} + Ec_e \quad \rightarrow \quad h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

También se usa en la forma $Ec_e = h \cdot (f - f_0)$



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.

b) La teoría clásica (u ondulatoria) de la luz supone que la luz (las o.e.m, en general) consiste en la trasmisión de una vibración de campos eléctricos y magnéticos a través de un medio que puede ser el vacío. La energía transmitida por esta onda electromagnética se realiza, pues, de forma continua (las partículas, por el contrario, transmiten energía de forma discreta, transportada por la propia partícula).
Suponiendo una transmisión continua de energía, al incidir la radiación sobre el metal, los electrones superficiales del mismo irían absorbiendo continuamente energía, independientemente de la frecuencia de la radiación. Así, más tarde o más temprano el electrón adquiriría energía suficiente para vencerla atracción del núcleo, produciéndose siempre la emisión de electrones.
Sin embargo, lo observado en las experiencias es que existe una frecuencia umbral, una frecuencia mínima por debajo de la cual la radiación no puede provocar la emisión de electrones, por mucho tiempo que esté incidiendo sobre el metal. Este hecho sólo puede explicarse suponiendo que en la interacción radiación-materia, la luz se comporta como partículas (ver el apartado anterior).

Otro aspecto experimental que no puede explicar la teoría ondulatoria de la luz es el hecho de que al suministrar más energía aumentando la intensidad de la luz pero sin variar su frecuencia, consigamos extraer un mayor número de electrones, pero no aumentar la energía cinética de los que se extraen.

Junio 2011. B.2

2. a) Explique la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico.

b) Razone si es posible extraer electrones de un metal al iluminarlo con luz amarilla, sabiendo que al iluminarlo con luz violeta de cierta intensidad no se produce el efecto fotoeléctrico. ¿Y si aumentáramos la intensidad de la luz?

a) El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética. La teoría ondulatoria clásica de Maxwell sobre la luz no podía explicar las características de este fenómeno, como la existencia de una frecuencia umbral, al suponer una transmisión continua de la energía.

Einstein aplicó las hipótesis cuánticas de Planck para explicar el efecto fotoeléctrico. 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" (posteriormente 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 $E_{fotón} = h \cdot f$

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_o). También puede definirse como la energía mínima que debe tener el fotón para extraer un electrón del metal. Así, tendremos que $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal.

Si el fotón no posee energía (frecuencia) suficiente, no podrá arrancar al electrón, y el fotón será emitido de nuevo. Esto explica la existencia de la frecuencia umbral.

Si la energía es superior al trabajo de extracción, la energía sobrante se emplea en darle energía cinética (velocidad) a los electrones emitidos. De este modo, llegamos a la expresión:

$$E_{fotón} = W_{extr} + Ec_e \quad \rightarrow \quad h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m v^2$$

Así, una mayor frecuencia de la radiación significará una mayor energía cinética de los electrones, pero no un mayor nº de electrones emitidos. Y una mayor intensidad de la radiación (mayor nº de fotones) significará un mayor nº de electrones emitidos, pero no una mayor energía cinética.

b) El color (o tipo) de la radiación viene dado por su frecuencia. Una luz violeta tiene mayor frecuencia que la amarilla y, por lo tanto, cada fotón de luz azul tiene mayor energía que un fotón de luz amarilla.

El enunciado nos dice que al incidir la luz azul no se emiten electrones, es decir, que los fotones no tienen energía suficiente (es menor que el trabajo de extracción). Por consiguiente, los fotones de la luz amarilla, de menor energía, tampoco podrán extraerlos.

Si aumentamos la intensidad de la luz amarilla, lo único que haremos es aumentar el número de fotones que inciden sobre el metal, pero no la energía de cada fotón, que depende exclusivamente de la frecuencia. Por lo tanto, tampoco se producirá emisión de electrones.

Junio 2010. A.4

4. Al iluminar potasio con luz amarilla de sodio de $\lambda = 5890 \cdot 10^{-10}$ m, se liberan electrones con una energía cinética máxima de $0{,}577 \cdot 10^{-19}$ J y al iluminarlo con luz ultravioleta de una lámpara de mercurio de $\lambda = 2537 \cdot 10^{-10}$ m, la energía cinética máxima de los electrones emitidos es $5{,}036 \cdot 10^{-19}$ J.
a) Explique el fenómeno descrito en términos energéticos y determine el valor de la constante de Planck.
b) Calcule el valor del trabajo de extracción del potasio.
$c = 3 \cdot 10^{8}$ m·s^{-1}

Nos encontramos ante un problema de efecto fotoeléctrico (emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética). Este fenómeno, que las teorías clásicas no podían explicar suponiendo un carácter ondulatorio para la luz, fue explicado por Einstein en 1905 suponiendo que en la interacción entre radiación y materia la luz adopta carácter de partícula, es decir, la energía de la luz incidente se transmite de forma discreta, concentrada en partículas o "cuantos" de luz, los fotones. La energía de un fotón depende de su frecuencia y viene dada por la expresión $E_f = h \cdot f$, donde h es la constante de Planck. En este problema, debemos calcular el valor de dicha constante a partir de dos experiencias de las que nos dan los datos.

Al incidir sobre los electrones externos del metal, el fotón cede su energía íntegramente al electrón. Para poder extraerlo del metal, esta energía debe ser superior a la necesaria para vencer la atracción del núcleo (trabajo de extracción $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal).
La energía sobrante se invierte en aportar energía cinética a los electrones.

El balance energético queda $E_f = \mathrm{W}_{extr} + Ec_e \rightarrow h \cdot f = \mathrm{W}_{extr} + Ec_e$

En la primera experiencia

$$\left.\begin{array}{l} \text{fotón: } \lambda = 5890 \cdot 10^{-10}\, m \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = 5{,}093 \cdot 10^{14}\, Hz \\ \text{electrones: } Ec_e = 0{,}577 \cdot 10^{-19}\, J \end{array}\right\} \quad h \cdot 5{,}093 \cdot 10^{14} = W_{extr} + 0{,}577 \cdot 10^{-19}$$

En la segunda experiencia

$$\left.\begin{array}{l} \text{fotón: } \lambda = 2537 \cdot 10^{-10}\, m \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = 1{,}182 \cdot 10^{15}\, Hz \\ \text{electrones: } Ec_e = 5{,}036 \cdot 10^{-19}\, J \end{array}\right\} \quad h \cdot 1{,}182 \cdot 10^{15} = W_{extr} + 5{,}036 \cdot 10^{-19}$$

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, obtenemos la resolución de los dos apartados del problema

a) $h = 6{,}629 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$

b) $W_{extr} = 2{,}799 \cdot 10^{-19}\ J$

Junio 2008. B.4

4. a) Un haz de electrones se acelera bajo la acción de un campo eléctrico hasta una velocidad de 6 ·10^5 m·s^{-1}. Haciendo uso de la hipótesis de De Broglie calcule la longitud de onda asociada a los electrones.

b) La masa del protón es aproximadamente 1800 veces la del electrón. Calcule la relación entre las longitudes de onda de De Broglie de protones y electrones suponiendo que se mueven con la misma energía cinética.

h = 6,63 ·10^{-34} J·s ; m$_e$ = 9,1 ·10^{-31} kg.

a) 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 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**.

Para los electrones del problema $$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ kg \cdot 6 \cdot 10^{5}\ ms^{-1}} = 1{,}21 \cdot 10^{-9}\ m$$

b) La energía cinética de una partícula viene dada por $Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2$. Si ambas partículas poseen la misma energía cinética, su velocidad será diferente. Así

$$v_p = \sqrt{\frac{2Ec}{m_p}} = \sqrt{\frac{2Ec}{1800 m_e}} = 0{,}0236 \cdot \sqrt{\frac{2Ec}{m_e}} = 0{,}0236 \cdot v_e$$

Sustituyendo en la expresión de De Broglie

$$\lambda_p = \frac{h}{m_p \cdot v_p} = \frac{h}{1800 m_e \cdot 0{,}0236 v_e} = 0{,}0235 \cdot \frac{h}{m_e \cdot v_e} = 0{,}0235 \cdot \lambda_e$$

Junio 2007.A.2

2. a) Explique, en términos de energía, el proceso de emisión de fotones por los átomos en un estado excitado.
b) Explique por qué un átomo sólo absorbe y emite fotones de ciertas frecuencias.

Respondemos a ambos apartados conjuntamente:

La emisión y absorción de fotones por parte de los átomos fue explicada por Niels Bohr en 1913, a partir de sus postulados, y completada por la Teoría Cuántica. Resumiendo brevemente:

- Los estados permitidos para el electrón en el átomo están cuantizados. Sólo están permitidos ciertos estados (orbitales) a los que corresponde una energía concreta.
- Mientras un electrón permanece en un estado permitido, su energía permanece constante.
- El estado de mínima energía de un átomo, en el que los electrones ocupan los estados con menor energía posible, se denomina estado fundamental.
- Cuando uno o más electrones están ocupando estados con mayor energía que el estado fundamental, dejando vacíos niveles inferiores, se habla de que el átomo está en un estado excitado.

<u>Emisión de fotones:</u>

Un electrón que se encuentra en un estado excitado, volverá al cabo de cierto tiempo a ocupar un nivel vacío inferior. Para ello realiza una transición electrónica desde un orbital de mayor energía hasta otro orbital de menor energía. La diferencia de energía se desprende en forma de radiación, emitiéndose un fotón cuya energía es igual a la diferencia entre ambos niveles. Por lo tanto, sólo se emitirán fotones con energías muy concretas, a los que corresponden frecuencias muy concretas ($E_{fotón} = h \cdot f$)

<u>Absorción de fotones:</u>

La absorción de fotones es el proceso inverso a la emisión. Al interaccionar un fotón con un electrón, le transmite su energía. Sólo si la energía del fotón se corresponde con la diferencia de energía entre dos niveles del átomo, el electrón saltará (realizará una transición) a un estado superior. En caso contrario, el fotón será nuevamente emitido, con lo que el átomo no lo absorberá. Como consecuencia, sólo serán absorbidos fotones con energías muy concretas, lo que implica que sus frecuencias también serán muy concretas ($E_{fotón} = h \cdot f$)

(Consecuencia: Esto explica la discontinuidad de los espectros atómicos de absorción y emisión, así como el hecho de que cada elemento químico tenga su espectro característico)

Junio 2006. B.4

4. 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.

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

a) Nos encontramos ante un problema de efecto fotoeléctrico (emisión de electrones por parte de un metal al incidir sobre él radiación electromagnética). Este fenómeno, que las teorías clásicas no podían explicar suponiendo un carácter ondulatorio para la luz, fue explicado por Einstein en 1905 suponiendo que en la interacción entre radiación y materia la luz adopta carácter de partícula, es decir, la energía de la luz incidente se transmite de forma discreta, concentrada en partículas o "cuantos" de luz, los fotones. La energía de un fotón depende de su frecuencia y viene dada por la expresión $E_f = h \cdot f$, donde h es la constante de Planck. En este problema, debemos calcular el valor de dicha constante a partir de dos experiencias de las que nos dan los datos.

Al incidir sobre los electrones externos del metal, el fotón cede su energía íntegramente al electrón. Para poder extraerlo del metal, esta energía debe ser superior a la necesaria para vencer la atracción del núcleo (trabajo de extracción $W_{extr} = h \cdot f_0$, donde f_0 es la frecuencia umbral característica del metal).
La energía sobrante se invierte en aportar energía cinética a los electrones.

El balance energético queda $E_f = W_{extr} + Ec_e$

La energía cinética de los fotoelectrones puede calcularse a partir del potencial de frenado V_{fr} (diferencia de potencial necesaria para frenar los electrones emitidos, reduciendo a cero su energía cinética)

$$V_{fr} = \frac{Ec_e}{e} \rightarrow Ec_e = e \cdot V_{fr} = 1,6 \cdot 10^{-19}\,C \cdot 1,3\,V = 2,08 \cdot 10^{-19}\,J$$

La energía del fotón: $E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}\,J\,s \cdot 3 \cdot 10^8\,ms^{-1}}{280 \cdot 10^{-9}\,m} = 7,07 \cdot 10^{-19}\,J$

Por lo tanto la función trabajo (trabajo de extracción) del metal se calcula

$$W_{extr} = E_f - Ec_e = 7,07 \cdot 10^{-19}\,J - 2,08 \cdot 10^{-19}\,J = 4,99 \cdot 10^{-19}\,J \quad (aprox.\ 2\ eV)$$

Y la frecuencia umbral del metal $f_0 = \frac{W_{extr}}{h} = \frac{4,99 \cdot 10^{-19}\,J}{6,6 \cdot 10^{-34}\,J\,s} = 7,56 \cdot 10^{14}\,Hz$

b) Usando el balance energético $E_f = W_{extr} + Ec_e$

i) La energía cinética máxima de los fotoelectrones disminuye, ya que está relacionada directamente con el potencial de frenado, y este disminuye. $Ec_e = e \cdot V_{fr} = 1,6 \cdot 10^{-19}\,C \cdot 0,7\,V = 1,12 \cdot 10^{-19}\,J$

iii) La energía de los fotones no cambia, ya que la luz incidente es la misma. Por tanto, si disminuye la Ec de los electrones arrancados (ya que disminuye el potencial de frenado) es porque la función trabajo del metal ha aumentado. Es necesaria una mayor energía para vencer la atracción por parte del núcleo.

$$W_{extr} = E_f - Ec_e = 7,07 \cdot 10^{-19}\,J - 1,12 \cdot 10^{-19}\,J = 6,05 \cdot 10^{-19}\,J$$

ii) La frecuencia umbral de fotoemisión aumenta. Son necesarios fotones más energéticos para arrancar los electrones. A partir del trabajo de extracción

$$f_0 = \frac{W_{extr}}{h} = \frac{6,05 \cdot 10^{-19}\,J}{6,6 \cdot 10^{-34}\,J\,s} = 9,17 \cdot 10^{14}\,Hz$$

Explicación química: La oxidación del metal (pérdida de electrones) debido a la luz incidente origina que los átomos de la superficie del metal se ionicen (se convierten en cationes, de carga positiva). Esto explica el hecho de que se necesite más energía para continuar arrancando electrones al metal ya oxidado.

Junio 2005. B.2

2. a) Enuncie la hipótesis de De Broglie. Comente el significado físico y las implicaciones de la dualidad onda-corpúsculo.

b) Un mesón π tiene una masa 275 veces mayor que un electrón. ¿Tendrían la misma longitud de onda si viajasen a la misma velocidad? Razone la respuesta.

a) El científico francés **Louis de Broglie**, basándose en los resultados de Planck, Einstein y otros (referentes al carácter dual de la luz), 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 onda-partícula.

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**.

Implicaciones: Es posible (y se ha comprobado) observar fenómenos característicos de las ondas, como interferencias, difracción, ondas estacionarias, en partículas como los electrones. Por ejemplo, el estudio cuántico del electrón en el átomo se realiza mediante la función de onda de Schrödinger.

En otros experimentos, sin embargo, es necesario considerar sólo el carácter corpuscular (rayos catódicos, efecto fotoeléctrico).

b) A partir de la ecuación ya expuesta en el apartado a), $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$, vemos que el mesón π (o pión), no va a tener la misma longitud de onda asociada que el electrón, si sus velocidades son idénticas. En este caso, al ser la masa del mesón π 275 veces mayor, su longitud de onda asociada será 275 veces menor que la del electrón.