SOLUCIÓN ACTIVIDADES TEMA 10. INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA MODERNA

Cuestiones

C 1. Los fenómenos físicos que no se podían explicar con los conocimientos de la Física Clásica a finales del XIX eran los siguientes: Radiación del cuerpo negro; interpretación de los espectros luminosos, el efecto fotoeléctrico, los rayos X, la radiactividad y el fracaso del experimento de Michelson-Morley.

El intento de explicación de estos fenómenos dio lugar a la teoría cuántica y a la teoría de la relatividad.

C2. Las leyes de Newton siguen teniendo su validez de aplicación para fenómenos que transcurren con velocidad muy pequeña comparada con la de luz. La teoría electromagnética de Maxwell sigue siendo válida para la explicación de todos los fenómenos electromagnéticos sin más que sustituir las ecuaciones de transformación de Galileo por las de Lorentz, para relacionar fenómenos acaecidos en distintos sistemas de referencia.

C3 De acuerdo con la ley de Wien al aumentar la temperatura del cuerpo emisor, la longitud de onda correspondiente al máximo de la energía emitida λ_m disminuye inversamente a los valores de *T.*

C4 Experimentalmente se comprueba que el cuerpo negro es tanto el mejor absorbente, como el mejor emisor de radiación térmica. Por el contrario un cuerpo blanco es el que menos absorbe y por tanto el que más refleja, en consecuencia, en verano deberán utilizarse prendas claras y evitar las obscuras, en particular las de color negro. En realidad el negro es la ausencia de cualquier color.

C5 La energía radiada en la unidad de tiempo (potencia) por una superficie *S* viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann $P = \sigma S T^4$. Aplicándola a las dos temperaturas del cuerpo negro y estableciendo el cociente resulta:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\sigma S T_2^4}{\sigma S T_1^4} = \frac{(2T)^4}{T^4} = 2^4 = 16\,; \qquad P_2 = 16\, P_1$$

Aplicando la ley de Wien la relación entre las longitudes de onda es:

$$\frac{\lambda_{2,m}}{\lambda_{1,m}} = \frac{C/T_2}{C/T_1} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T}{2T} = \frac{1}{2}\,; \qquad \text{o bien:} \qquad \lambda_{2,m} = \tfrac{1}{2}\, \lambda_{1,m}$$

C6 El fotón con energía mayor que el trabajo de extracción del metal, penetra por debajo de la superficie del metal interaccionando con un electrón y proporcionándole la energía necesaria para llevarlo hasta la superficie y además, una cierta cantidad de energía cinética para que pueda ser expulsado del metal.

C7 De acuerdo con la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico, la energía cinética del fotoelectrón vale:

$$E_c = h \cdot \upsilon - \Phi = h \cdot \upsilon - h \cdot \upsilon_0 = h \cdot 3\, \upsilon_0 - h \cdot \upsilon_0 = 2\ h \cdot \upsilon_0$$ *El doble del trabajo de extracción*

C8 Dentro del tubo de Coolidge se establece una alta diferencia de potencial de cientos de miles de voltios, entre el cátodo y el anticátodo, de modos que los electrones emitidos por el cátodo caliente llegan al anticátodo con mucha energía cinética y pueden penetrar hasta las capas internas del metal. Al colisionar con los electrones los lanzan a capas más exteriores dejando huecos. Inmediatamente saltan electrones más exteriores hasta estos lugares vacantes, emitiéndose la diferencia de energía entre las capas, en forma de rayos X (radiación).

C9 Los cuerpos que poseen átomos con muchos electrones, interaccionan más fácilmente con los fotones de rayos X cuando son atravesados, cediéndole su energía. En consecuencia, son mejores absorbentes de rayos X que aquellos otros con menos electrones.

C10 El fotón incidente actúa como un corpúsculo colisionando con un electrón y cediéndole parte de su energía, razón por la cual este fotón la disminuye y por lo tanto su frecuencia , recuérdese que $\nu = \frac{E}{h}$. Como consecuencia aumentará su longitud de onda porque $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

C11 Porque únicamente en ciertas trayectorias que están cuantificadas, el electrón se puede encontrar girando sin emitir energía por radiación y de este modo se justifica que no termine precipitándose sobre el núcleo atómico.

C12 Los radios de las órbitas permitidas están cuantificados y su relación con el radio de la primera órbita es $r_n = n^2 \cdot r_1$. Para las órbitas segunda y tercera resulta.

$$\frac{r_3}{r_2} = \frac{3^2\, r_1}{2^2\, r_1} = \frac{9}{4}$$

La razón entre los radios de las órbitas es la de números enteros 9/4

C13 Las energías de los distintos niveles también están cuantificados, $E_n = E_1 / n^2$. Para las órbitas segunda y tercera resulta.

$$\frac{E_3}{E_2} = \frac{E_1 / 3^2}{E_1 / 2^2} = \frac{4}{9}$$

La razón entre las energías de estas órbitas es la de los números enteros 4/9

C14 Porque el átomo excitado es inestable y para relajarse necesita devolver la energía absorbida en la excitación y lo hace emitiéndola en forma de radiación electromagnética. La frecuencia de la radiación emitida está relacionada con la diferencia de energías entre los dos niveles, por la ecuación:

$$E_i - E_F = h \cdot \upsilon$$

C15 Porque con la fórmula de Balmer se calculaban las longitudes de onda de las rayas espectrales del hidrógeno en el visible, medidas también experimentalmente. Un modelo atómico que justificara razonablemente esta fórmula debería estar cercano a la estructura del átomo de hidrógeno.

C16 Las partículas macroscópicas no producen imágenes de interferencias, sin embargo, cuando el experimento se efectúa con partículas microscópicas como por ejemplo electrones, se observa que éstos producen figuras de interferencias semejantes a las de las ondas luminosas, por lo que aún siendo partículas también tienen un comportamiento ondulatorio debido a su onda de materia asociada.

C17 La energía del fotón viene dada por $E = h \cdot \nu$ y como la frecuencia se relaciona con la longitud de onda por $\nu = c/\lambda$ pues el fotón viaja a la velocidad de la luz, resulta en definitiva para la longitud de onda en función de la energía $\lambda = h\ c/E$. La masa relativista se obtiene de despejarla de la ecuación de Einstein, $m = E/c^2$ y el momento lineal del fotón es $p = E/c$. En cuanto a la masa en reposo del fotón es siempre nula.

C18 Que tanto las partículas materiales como la radiación tienen carácter corpuscular y ondulatorio. Sin embargo ningún experimento es capaz de revelar a la vez el carácter dual de la materia y de la radiación, mostrando únicamente una de las dos naturalezas.

C19 De acuerdo con el principio de incertidumbre, la incertidumbre en la medida del tiempo Δt tiene que igual o mayor que: $\Delta t \ge h/2\pi \quad \Delta E$

■ EJERCICIOS

E1 $\upsilon = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{3.10^8\ m/s}{0{,}18.10^{-10}\ m} = 1{,}67.10^{19}\ Hz$; $\qquad E = h \cdot \upsilon = 1{,}10.10^{-14}\ J = 68{,}9.10^3\ eV$

E2 . La energía radiada en la unidad de tiempo es por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma\ S T^4 = 5{,}67.10^{-8}\ \frac{W}{m^2\ K^4}\left(2\,\pi \cdot 5.10^{-2}\ m \cdot 1{,}5\ m\right)(273+110)^4\ K^4 = 575\,W$$

El calor radiado en *1 h* es: $\quad Q = E \cdot t = 575\,W \cdot 3600\,s = 2{,}1\,.10^6\ J$

E3 . De la ley de Wien:

$$\lambda_{máx\,F} = \frac{C}{T} = \frac{2{,}90.10^{-3}\ K \cdot m}{(1535+273)} = 1{,}6{,}10^{-6}\ m; \qquad \lambda_{máx\,E} = \frac{2{,}90.10^{-3}\ K \cdot m}{(2750+373)} = 0{,}96.10^{-6}\ m$$

Infrarrojo — Infrarrojo próximo al rojo

E4 De la ley de Wien:

$$T = \frac{C}{\lambda} = \frac{2{,}90.10^{-3}\ K \cdot m}{4026.10^{-10}\ m} = 7203\,K$$

E5 Se calculan las frecuencias correspondientes a estas longitudes de ondas límites y resulta:

$$\upsilon_{máx} = \frac{c}{\lambda_{mín}} = \frac{3.10^8\ m/s}{4000.10^{-10}\ m} = 7{,}5.10^{14}\ Hz; \qquad \upsilon_{mín} = \frac{c}{\lambda_{máx}} = \frac{3.10^8\ m/s}{7500.10^{-10}\ m} = 4{,}0.10^{14}\ Hz$$

Se deduce que sí porque la frecuencia $7{,}5.10^{14}\ Hz > 6{,}65.10^{14} Hz$ que es la incidente.

E6 $\upsilon = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{3.10^8\ m/s}{1{,}3.10^{-3} \cdot 10^{-10}\ m/s} = 2{,}3.10^{21}\ Hz$

Como es $\nu > \nu_0$ que es la frecuencia umbral, hay efecto fotoeléctrico.

$$\Phi = h \cdot \upsilon_0 = 6{,}63.10^{-34}\ J \cdot s\ \ x13{,}65.10^{14}\ Hz = 9.10^{-19}\ J = 5{,}6\ eV$$

$$E_c = h \cdot \upsilon - \Phi = 1{,}52.10^{-12}\ J = 9{,}5.10^6\ eV$$

E7 El trabajo eléctrico sobre el electrón es:

$$W = |-e|\ V = 1{,}6.10^{-19}\ C \cdot 50\ 000\ J = 8{,}0.10^{-15}\ J$$

$$E = W = h\,\frac{c}{\lambda}; \qquad \lambda = \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\,s \cdot 3.10^8\ m/s}{8{,}0.10^{-15}\ J} = 2{,}5.10^{-11}\ m = 0{,}25\ \mathring{A}$$

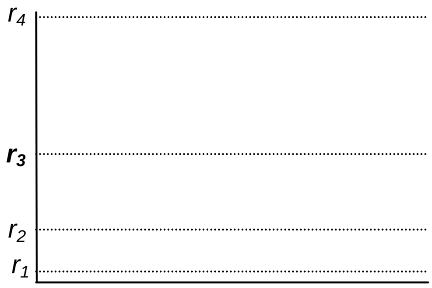
E8 La longitud de onda $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,63.10^{-34}\ J\ s \cdot 3.10^{8}\ m\ /s}{7.10^{-11}\ J} = 2,84.10^{-15}\ m$

La longitud de onda del fotón dispersado de cuerdo con la ecuación de Compton:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_C\left(1-\cos 30^o\right) = 2,84.10^{-15}\ m + 2,43.10^{-12}\ m\left(1-\cos 30^o\right) = 328.10^{-15}\ m$$

E9 Se trata de representar valores discretos de una magnitud cuantificada, $r_n = r_1 \cdot n^2$; siendo $r_1 = 0,53$ Å

$n = 1$ $\quad r_1 = 0,53$ Å
$n = 2$ $\quad r_2 = 0,53$ Å $\cdot\ 2^2 = 2,12$ Å
$n = 3$ $\quad r_3 = 0,53$ Å $\cdot\ 3^2 = 4,77$ Å
$n = 4$ $\quad r_4 = 0,53$ Å $\cdot\ 4^2 = 8,48$ Å



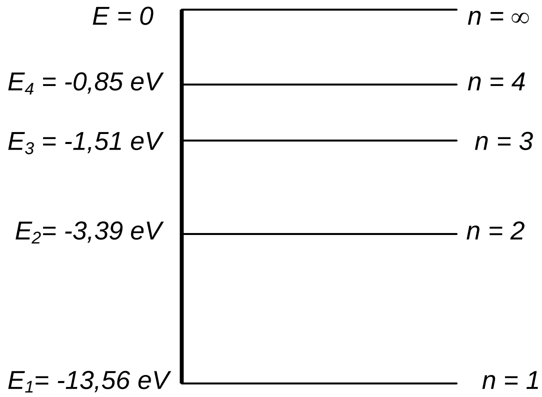
E10 La energía de un *nivel-n* en el átomo de Bohr es $E_n = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13,56\ eV}{n^2}$

Para $n = 1;$ $E_1 = -13,56\ eV$

Para $n = 2;$ $E_2 = -3,39\ eV$

Para $n = 3;$ $E_3 = -1,51\ eV$

Para $n = 4;$ $E_4 = -0,85\ eV$



E11 Las frecuencias correspondientes son:

$$\upsilon_{41} = \frac{E_4 - E_1}{h} = \frac{\left[-0,85-\left(-13,56\right)\right]1,6.10^{-19}\ J}{6,63.10^{-34}\ J\ s} = 3,07.10^{15}\ Hz\ ;$$

$$\upsilon_{31} = \frac{E_3 - E_1}{h} = \frac{\left[-1,51-\left(-13,56\right)\right]1,6.10^{-19}\ J}{6,63.10^{-34}\ J\ s} = 2,91.10^{15}\ Hz$$

$$\upsilon_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{\left[-3,39-\left(-13,56\right)\right]1,6.10^{-19}\ J}{6,63.10^{-34}\ J\ s} = 2,45.10^{15}\ Hz$$

E12 Aplicando la fórmula de Balmer teniendo en cuenta que $n_F = 2$ y que $n_I = 2+5 = 7;$ resulta:

$$\frac{1}{\lambda} = 10967757,6\ m^{-1}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{7^2}\right) = 2518107,6\ m^{-1};\quad \lambda = 3\ 971,2.10^{-10}\ m = 3\ 971,2\ \text{Å}$$

Está en el límite del visible.

E13 La onda de materia asociada u onda de de Broglie, tiene de longitud de onda:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\ s}{1800\ kg \cdot \left(300 \cdot 10^{3}\ m\ /\ 3600\ s\right)} = 4{,}42.10^{-39}\ m$$

E14 $$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\ s}{6.10^{24}\ kg \cdot \left(30.10^{3}\ m/s\right)} = 3{,}70.10^{-63}\ m$$

E15 La incertidumbre en la posición es:

$$\Delta x \geq \frac{h}{2\pi\,\Delta p} = \frac{6{,}63.10^{-34}\,J\,s}{2\pi \cdot 5.10^{-25}\,kg \cdot m\ /s} = 2{,}1.10^{-10}\ m$$

PROBLEMAS

P1 Vamos a considerar al Sol como un cuerpo puntual y como se proporciona como dato, la energía *E* que alcanza a la Tierra por m^2 y en cada segundo. La energía emitida por el Sol en cada segundo será:

$W/t = E \cdot S$; siendo *S* una superficie esférica con centro en el Sol y de radio $r = 149{,}7.10^{6}\ km$.

$$W/t = 1393\ \frac{J}{m^{2} \cdot s}\ 4\,\pi \left(149{,}7.10^{9}\ m\right)^{2} = 3{,}92.10^{26}\ \frac{J}{s}$$

Para calcular la temperatura del Sol vamos a aplicar la ley de Stefan-Boltzmann, considerando al Sol como una esfera de radio $R_S = 0{,}695.10^{6}\ km$ y considerándolo como un cuerpo negro, lo que no es del todo cierto.

$$T = \left(\frac{W/t}{\sigma \cdot S_{SOL}}\right)^{1/4} = \left(\frac{3{,}92.10^{26}\ J/s}{5{,}67.10^{-8}\ \frac{W}{m^{2}\ s}\ 4\,\pi \left(0{,}695\ .10^{9}\ m\right)^{2}}\right)^{1/4} = 5809\ K$$

P2 El trabajo de extracción: $\Phi = h \cdot \nu_0 = 6{,}6{,}3.10^{-34}\ J\ s \cdot 13{,}04.10^{14}\ Hz = 8{,}64.10^{-19}\ J$

La energía cinética de los fotoelectrones:

$$E_c = h\,\upsilon - \Phi = h\,\frac{c}{\lambda} - \Phi = 6{,}63.10^{-34}\ J\ s\ \frac{3.10^{8}\ m/s}{100.10^{-10}\ m} - 8{,}64.10^{-19}\ J = 1{,}90.10^{-17}\ J$$

La velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{2\,E_C}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}90.10^{-17}\ J}{9{,}1.10^{-31}\ kg}} = 6466\ {}^{km}\!/_{s}$$

P3. Un fotón de rayos *X* con energía $1{,}325.10^{-11}$ J colisiona con un electrón libre, regresando el fotón en sentido contrario. Determina: a) Longitud de onda del fotón rebotado. b) Su energía.

Solución:

a) De acuerdo con la ecuación de Compton el fotón sufre un cambio en su longitud de onda, sin embargo se debe determinar primero la longitud de onda del fotón incidente.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = 6{,}626.10^{-34}\, J \cdot s \frac{3.10^{8}\, m/s}{1{,}325.10^{-11}\, J} = 1{,}500.10^{-14}\, m$$

$$\lambda' = \lambda_C (1 - \cos\theta) + \lambda = 2{,}43.10^{-12}\, m \left(1 - \cos 180^o\right) + 1{,}500.10^{-14}\, m = 4{,}875.10^{-12}\, m$$

b) La enregía correspondiente:

$$E' = h \frac{c}{\lambda'} = 6{,}626.10^{-34}\, J \cdot s \frac{3.10^{8}\, m/s}{4{,}875.10^{-12}\, m} = 4{,}078.10^{-14}\, J$$

P4 La energía cinética de los fotoelectrones emitidos se puede calcular mediante el potencial de frenado. En efecto:

$$E_c = |e| \cdot V_f = 1{,}6.10^{-19}\, C \cdot 0{,}11 V = 1{,}76.10^{-20}\, J$$

De la ecuación del efecto fotoeléctrico:

$$\Phi = h\nu - E_c = h\frac{c}{\lambda} - E_c = 6{,}63.10^{-34}\, Js \frac{3.10^{8}\, m/s}{2{,}536.10^{-10}\, m} = 7{,}8.10^{-16}\, J = 4902\, eV$$

P5 Un electrón salta de forma espontánea en el átomo de hidrógeno, desde el nivel n = 5 hasta el nivel n = 2. Determina para el fotón emitido: a) La energía, la frecuencia y la longitud de onda. b) El momento lineal del fotón.

Del modelo de Bhor:

a) La energía de un *nivel-n* es: $E_n = \frac{E_1}{n^2}$; $E_5 = \frac{E_1}{5^2}$; $E_2 = \frac{E_1}{2^2}$; $E_1 = -13{,}56\ J$

$$E_{5,2} = E_5 - E_2 = -13{,}56 \cdot 1{,}6.10^{-19}\, J \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{4}\right) = 4{,}56.10^{-19}\, J$$

La frecuencia del fotón: $\upsilon = \frac{E_{5,2}}{h} = \frac{4{,}56.10^{-19}\, J}{6{,}63.10^{-34}\, J} = 6{,}88.10^{14}\, Hz$

La longitud de onda: $\lambda = \frac{c}{\upsilon} = \frac{3.10^{8}\, m/s}{6{,}88.10^{14}\, Hz} = 4361{,}8\ \AA;$

b) De acuerdo con la ecuación de de Broglie, el momento lineal del fotón vale:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6{,}63.10^{-34}\, J\, s}{4361{,}8.10^{-10} m} = 1{,}52.10^{-27}\, kg \cdot \frac{m}{s}$$

P6 Resulta $n_F = 4;$ $n_I = 4 + 4 = 8.$ Sustituyendo en la fórmula de Rydberg resulta:

$$\frac{1}{\lambda} = 10\,967\,757{,}6\, m^{-1} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{8^2}\right) = 514\,113{,}6\, m^{-1};$$

λ = 19 450,9.10^{-10} m = 19 450,9 Å; Infrarrojo

P7 El trabajo que el campo eléctrico efectúa sobre el protón vale:

$$W = +e \cdot \Delta V = 1{,}6.10^{-19}\ C \cdot 5000V = 8.10^{-16}\ J$$

Este trabajo se invierte en energía cinética de acuerdo con la ecuación de la energía $W = \frac{1}{2} mv^2$ y la velocidad es:

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8.10^{-10}\ J}{1{,}67.10^{-27}\ kg}} = 978{,}8.10^3\ \frac{m}{s}$$

El momento lineal del fotón:

$$p = m \cdot v = 1{,}67.10^{-27}\ kg \cdot 978{,}8.10^3\ m/s = 1{,}63.10^{-21}\ kg \cdot m/s$$

La longitud de onda de de Broglie: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\,s}{1{,}63.10^{-21}\ kg \cdot m/s} = 4{,}1.10^{-13}\ m$

P8 $W = |-e| \cdot \Delta V = 1{,}6.10^{-19} C \cdot 15000 V = 2{,}4.10^{-15} J$

$$\upsilon = \frac{|W|}{h} = \frac{2{,}4.10^{-15}\ J}{6{,}63.10^{-34}\ J\,s} = 3{,}6.10^{-18}\ Hz$$

$$\lambda = \frac{c}{\upsilon} = \frac{3.10^8\ m/s}{3{,}6.10^{18}\ Hz} = 0{,}83.10^{-10}\ m = 0{,}83\ Å$$

P9 Del principio de incertidumbre posición-momento lineal: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}$ se despeja la incertidumbre del momento lineal:

$$\Delta p_x \geq \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\ s}{2\pi \cdot 10^{-10}\ m} = 1{,}1.10^{-24} kg \cdot m/s$$

El momento lineal se puede calcular del conocimiento de la energía cinética del electrón:

$$E_C = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p_x^2}{2m};$$

$$p_x = \sqrt{2m \cdot E_c} = \sqrt{2 \cdot 9{,}1.10^{-31}\ kg \cdot 10^3 \cdot 1{,}6.10^{-19}\ J} = 1{,}7.10^{-23}\ kg\ m/s$$

$$\frac{\Delta p_x}{p_x} = \frac{1{,}1.10^{-24}}{1{,}7.10^{-23}} = 0{,}06 = 6\%$$

P10 Aplicando el principio de incertidumbre tiempo-energía, la indeterminación de ésta es:

$$\Delta E \geq \frac{h}{2\pi \Delta t} = \frac{6{,}63.10^{-34} J \cdot s}{2\pi \cdot 10^{-8}\ s} = 1{,}1.10^{-26} J$$

La longitud de onda del fotón se obtiene de la ecuación $E_4 - E_2 = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda}$;

$$\lambda = \frac{hc}{E_4 - E_2} = \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\,s \cdot 3.10^8\ m/s}{\left[\frac{-13{,}56}{4^2} - \left(\frac{-13{,}56}{2^2}\right)\right] 1{,}6.10^{-19}\ J} = \frac{6{,}63.10^{-34}\ J\,s \cdot 3.10^8\ m/s}{4{,}068.10^{-19}\ J} = 4{,}889.10^{-7}\ m$$

Haciendo E_I - E_F = E ; $E = \frac{hc}{\lambda}$; teniendo en cuenta que h y c son constantes, se verifica que:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}; \quad \Delta\lambda = \lambda \frac{\Delta E}{E} = 4{,}889.10^{-7}\,m \frac{1{,}1.10^{-26}\,J}{4{,}068.10^{-19}\quad J} = 1{,}5.10^{-14}\,m$$

P11 $\lambda' - \lambda = \lambda_C\left(1-\cos\theta\right) = 2{,}43.10^{-12}\,m\left(1-\cos 90^{o}\right) = 2{,}43.10^{-12}\,m$

$$\lambda' = 0{,}2.10^{-10}\,m + 2{,}43.10^{-12}\,m = 22{,}43.10^{-12}\,m = 0{,}22.10^{-10}\,m$$

P12 De acuerdo con la ecuación de Einstein de la energía de una masa en reposo:

$$E_o = mc^2; \quad m = \frac{3{,}9.10^{26}\,J}{\left(3.10^8\right)^2} = 4{,}3.10^9\,kg$$

P13 $2m = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$; $\quad 2m = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2};}}$; $\quad v = \frac{\sqrt{3}}{2}c = \frac{\sqrt{3}}{2}300000\frac{km}{s} = 259808\frac{km}{s}$

P14 $m = \frac{9{,}109.10^{-31}\,kg}{\sqrt{1-\frac{0{,}10^2\,c^2}{c^2}}} = 9{,}155.10^{-31}\,kg$

$$m = \frac{9{,}109.10^{-31}\,kg}{\sqrt{1-\frac{0{,}90^2\,c^2}{c^2}}} = 20{,}9.10^{-31}\,kg$$

P15 Nuestro sistema de referencia está en reposo respecto de la partícula

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \qquad \Delta t = \Delta t' + 0{,}1\Delta t' = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \qquad \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{1{,}1}$$

$$1-\frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{1}{1{,}1}\right)^2; \qquad v = c\sqrt{1-\frac{1}{1{,}1^2}} = 300000\frac{km}{s}0{,}416 = 124979\frac{km}{s}$$

P16 **a)** La energía cinética del electrón es igual al trabajo que realiza sobre él, el campo eléctrico: $W = \Delta E_c = \left|e\right|\left(V - V'\right) = 1{,}6.10^{-19}\,C \cdot 500000V = 8.10^{-14}\,J$

b) La energía en reposo: $E_o = m \cdot c^2 = 9{,}109.10^{-31}\,kg \cdot \left(3.10^8\,\frac{m}{s}\right)^2 = 8{,}2.10^{-14}\,J$

c) Su energía total: $E = E_c + E_o = 8{,}0.10^{-14}\,J + 8{,}20.10^{-14}\,J = 1{,}62.10^{-14}\,J$

P17 La energía cinética es igual al trabajo del campo eléctrico:

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = q\left(V - V'\right)$$

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{(c/2)^2}{c^2}}}-mc^2=q(V-V'); \qquad V-V'=\frac{mc^2}{q}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}-1\right)$$

$$V-V'=\frac{1,67.10^{-27}\left(3.10^8\right)^2}{1,6.10^{-19}}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}-1\right)=145.10^6\,V$$

P18 Empleando la ecuación de la contracción de longitudes:

$$L=L_o\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=10\,m\sqrt{1-\frac{(0,1c)^2}{c^2}}=9,95\,m$$