



## Actividades

### 1. Resuelve las siguientes cuestiones:

a) Se sabe que la mayor sensibilidad del ojo humano corresponde a la luz que tiene una longitud de onda de  $5,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . ¿Cuál es la energía de los fotones que tienen dicha longitud de onda, en eV?

b) ¿Cuál es la energía de un fotón de luz roja de 720 nm de longitud de onda?

$$a) E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{5,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,62 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,26 \text{ eV}$$

$$b) E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{5,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,62 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,26 \text{ eV}$$

2. La estrella Sirio de la constelación Can Mayor tiene un color blanco azulado, mientras que Antares de la constelación de Escorpión presenta un color amarillo rojizo. ¿Cuál de las dos tiene una mayor temperatura superficial?

De acuerdo con la Ley de Wien, tiene mayor temperatura la estrella que emite una radiación de menor longitud de onda. En este caso, la estrella Sirio, ya que la luz azul tiene una frecuencia mayor que la luz roja.

3. ¿Qué fotón es más energético, el de luz verde o el de luz ultravioleta?

La energía del fotón de luz ultravioleta es mayor que la del fotón de luz verde, ya que la frecuencia de la luz ultravioleta es mayor que la de la luz verde:  $E = hf$ .

4. ¿Cuál es la temperatura aproximada de la superficie de una estrella que emite luz azul de 4600 Å de longitud de onda en el máximo de intensidad? Enuncia la ley que te permite resolver el problema.

Al aplicar la Ley de Wien, resulta:

$$\lambda_{\text{máx}} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}}{4,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 6300 \text{ K}$$

5. Un foco de luz monocromática emite ondas electromagnéticas de 620 nm de longitud de onda.

a) ¿Cuál es la energía de cada fotón?

b) ¿Qué potencia tiene el foco si emite  $10^{20}$  fotones por segundo?

a) La energía de cada fotón se obtiene a partir de la hipótesis de Planck:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

b) La potencia del foco se calcula considerando la energía emitida por el foco en un segundo:

$$P = 10^{20} \text{ fotones/s} \cdot 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ J/fotón} = 32 \text{ J s}^{-1} = 32 \text{ W}$$

6. ¿Qué entiendes por cuerpo negro? ¿Existen en la Naturaleza? Pon algún ejemplo de cuerpo negro.

Un cuerpo negro es aquel que es capaz de absorber todas las radiaciones que llegan a él. No se conoce ningún cuerpo que se comporte rigurosamente como negro, pero se puede considerar como tal cualquier material resistente al calor que contenga una cavidad, con paredes rugosas y muy absorbentes, comunicada con el exterior por un pequeño orificio.

7. Un metal que se encuentra a elevada temperatura emite una radiación cuyo máximo corresponde a una longitud de onda de 680 nm. Si la potencia emitida por el metal es 0,040 W, ¿cuántos fotones emite en 1 minuto?

$$\text{La energía de cada fotón es: } E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 2,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Número de fotones: } N = \frac{P t}{E} = \frac{0,040 \text{ J s}^{-1} \cdot 6,0 \text{ s}}{2,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 8,3 \cdot 10^{18} \text{ fotones}$$

8. Un haz de luz ultravioleta tiene una frecuencia de  $7,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ .

a) ¿Cuál es su longitud de onda?

b) ¿Qué energía le corresponde a cada fotón, en eV?

$$a) \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{7,5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

$$b) E = hf = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 7,5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} = 5 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$E = \frac{5 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 31 \text{ eV}$$

9. Se ilumina un metal con luz correspondiente a la región del amarillo, observando que se produce efecto fotoeléctrico. Explica si se modifica o no la energía cinética máxima de los electrones emitidos:

a) Si iluminando el metal con la luz amarilla indicada se duplica la intensidad de la luz.

b) Si se ilumina el metal con luz correspondiente a la región del ultravioleta.

La energía de un fotón ( $E = hf$ ) se invierte en arrancar un electrón ( $W_e$ ) y en suministrarle energía cinética.

a) Si se duplica la intensidad de la luz se duplicará el número de fotones, no la energía de cada fotón, por tanto, se arrancarán más electrones, sin variar su energía cinética.

b) La luz ultravioleta es de mayor frecuencia que la amarilla, por lo que sus fotones tienen mayor energía. Como el trabajo de extracción es constante, los electrones emitidos tendrán mayor energía cinética.

10. Cuando una luz monocromática de 300 nm de longitud de onda incide sobre una muestra de litio, los electrones emitidos tienen una energía cinética máxima de 1,65 eV. Calcula:

a) La energía del fotón incidente.

b) La función de trabajo del litio.

c) La energía cinética máxima de los electrones emitidos, cuando la longitud de onda de los fotones es de 400 nm.



**d) La longitud de onda máxima de la radiación electromagnética para producir el efecto fotoeléctrico en el litio.**

Energía del fotón = Trabajo de extracción + Energía cinética:  
 $hf = W_e + E_c$

$$a) E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{300 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$b) W_e = E - E_c = 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ J} - 1,65 \text{ eV} \cdot (1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 3,99 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$c) E_c = E - W_e = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{400 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 3,99 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 9,80 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$d) E_c = 0; \quad E - W_e = 0; \quad W_e = hf = \frac{hc}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{hc}{W_e}$$

$$\lambda = \frac{hc}{W_e} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{3,99 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 4,98 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 498 \text{ nm}$$

**11. La longitud de onda umbral de la plata para que se produzca efecto fotoeléctrico es de 262 nm.**

a) Hallar la función de trabajo de la plata.

b) Hallar la energía cinética máxima de los electrones si la longitud de onda de la luz incidente es de 175 nm.

$$a) W_e = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{262 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 7,59 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$b) E_c = E - W_e = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{175 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 7,59 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,81 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

**12. ¿Cuáles son los valores de  $n_1$  y  $n_2$  para la tercera raya de la serie de Lyman?**

Para la serie de Lyman  $n_1 = 1$ . Para la tercera raya  $n_2 = 4$ .

**13. Un electrón salta entre dos niveles cuya diferencia de energía es de  $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ J}$ . ¿Cuál es la frecuencia de la radiación?**

Al saltar de un nivel de energía externo a otro de menor energía, emite la diferencia de energía existente entre ambos niveles, con una frecuencia dada por la ecuación:

$$E_2 - E_1 = hf; \quad f = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{1,5 \cdot 10^{-15} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}} = 2,26 \cdot 10^{18} \text{ s}^{-1}$$

**14. Dos partículas no relativistas tienen asociada la misma longitud de onda de De Broglie. Si la masa de una de ellas es el doble que la masa de la otra, determina:**

a) La relación entre sus momentos lineales.

b) La relación entre sus velocidades.

a) La longitud de onda de De Broglie es  $\lambda = h/p$ . Como la longitud de onda es la misma para las dos partículas y  $h$  es la constante de Planck, los momentos lineales de las partículas ( $p$ ) también son iguales.

b) Como el momento lineal de una partícula es el producto de su masa por su velocidad y los momentos lineales son igua-

les, el producto  $m v$  es igual en ambas partículas. Por tanto, si la masa de una de ellas es el doble, su velocidad debe ser la mitad que la velocidad de la otra partícula.

**15. ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie asociada a un haz de neutrones de 0,05 eV de energía?**

Datos: masa del neutrón =  $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

$$E_c = 0,05 \text{ eV} = 0,05 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 8 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h}{\sqrt{2 m E_c}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 8 \cdot 10^{-21} \text{ J}}} = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1,3 \text{ \AA}$$

**16. Calcula la longitud de onda asociada a las siguientes partículas:**

a) Un neutrón cuya velocidad es de  $1,01 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$ .

b) Una pelota de tenis de 50,0 g de masa que se mueve con una velocidad de  $250 \text{ m s}^{-1}$ .

$$a) \lambda = \frac{h}{m_n v_n} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1,67 \cdot 10^{27} \text{ kg} \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}} = 3,97 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$b) \lambda = \frac{h}{m_t v_t} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{50,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 250 \text{ m s}^{-1}} = 5,30 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

**17. Determina la longitud de onda asociada con los electrones que han sido acelerados mediante una diferencia de potencial de 1000 V.**

La longitud de onda de De Broglie es:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2 m V e}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}} = 3,9 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 0,39 \text{ \AA}$$

**18. Conocemos la posición de un neutrón y una piedra de 0,1 kg con una aproximación de 1 \AA.**

a) ¿Cuál es para cada uno la imprecisión en la medida de su momento lineal?

b) ¿Cuál es la imprecisión en el conocimiento de su velocidad? ¿Qué conclusión puedes deducir de los resultados obtenidos?

Como la incertidumbre en el conocimiento de la posición es la misma para el neutrón que para la piedra, la imprecisión en la medida de su momento lineal también será la misma:

$$\Delta p \geq \frac{h}{2 \pi \cdot \Delta x} \geq \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-10} \text{ m}} \geq 1,05 \cdot 10^{-24} \text{ kg m s}^{-1}$$

Al ser la masa muy diferente, la indeterminación en la velocidad será muy distinta.

Para el neutrón:

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{m} \geq \frac{1,05 \cdot 10^{-24} \text{ kg m s}^{-1}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \geq 628 \text{ m s}^{-1}$$

Para la piedra:

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{m} \geq \frac{1,05 \cdot 10^{-24} \text{ kg m s}^{-1}}{0,1 \text{ kg}} \geq 1,05 \cdot 10^{-23} \text{ m s}^{-1}$$



El Principio de Indeterminación de Heisenberg solo es significativo para dimensiones tan pequeñas como las que presentan las partículas elementales. En Mecánica clásica carece de interés, pues las magnitudes involucradas son muy grandes comparadas con el valor de la constante  $h$ .

**19. Responde a las siguientes preguntas:**

- ¿Por qué se abandona el concepto de órbita electrónica en la Física Cuántica?**
- ¿Por qué el Principio de Heisenberg no es aplicable en la Física clásica?**
- ¿Crees que son las limitaciones técnicas de los instrumentos de medida las responsables del Principio de Incertidumbre de Heisenberg?**
- ¿Por qué no podemos observar un electrón sin alterarlo?**
  - Por la imposibilidad de determinar la posición y la velocidad del electrón, con precisión, en un instante dado.
  - Porque las magnitudes involucradas son muy grandes comparadas con el valor de la constante de Planck.
  - No, se debe al comportamiento de la materia.
  - Porque todos los objetos están regidos por el Principio de Incertidumbre.

**20. ¿Qué diferencias fundamentales encuentras entre el concepto de órbita y el de orbital?**

El concepto de órbita pertenece a la Física clásica, según la cual todas las magnitudes relativas a un sistema pueden, en principio, determinarse simultáneamente con cualquier grado de precisión.

Esto no ocurre en la Física Cuántica. Si no es posible determinar la posición y la velocidad de un electrón en un instante dado, no es posible definir el concepto de trayectoria y no tiene sentido hablar de órbitas electrónicas en los átomos.

**21. Indica el valor de los números cuánticos  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ , en el orbital atómico  $3d$ .**

$$n = 3, l = 2, m_l = 2, 1, 0, -1, -2.$$

**22. Describe las principales características de la radiación láser comparándola con la radiación térmica.**

La radiación láser es de una sola frecuencia, estando todas las ondas con diferencia de fase constante, es luz coherente, enormemente intensa. La luz ordinaria no es coherente, puesto que las ondas que la forman son de diversas frecuencias y no están en fase.

**23. Haz una relación de las aplicaciones más importantes del láser.**

Véase libro de texto, Apartado 12.8A.

**24. ¿Cuáles son las características más importantes de un material semiconductor?**

Son materiales que poseen una conductividad eléctrica intermedia entre conductores y aislantes. Su conductividad aumenta con la temperatura y puede modificarse si el material se somete a una radiación electromagnética de suficiente energía.

El elemento semiconductor más usado es el silicio, también se usa el germanio, y compuestos como GaAs, CdTe, CdS, etc. Existen semiconductores tipo  $N$  y tipo  $P$ .

**25. ¿Cómo se obtienen los semiconductores tipo  $P$  y tipo  $N$ ?**

En los semiconductores tipo  $N$ , el elemento semiconductor (generalmente silicio) se dopa con elementos que tengan cinco electrones en su última capa: arsénico, fósforo o antimonio. Los semiconductores tipo  $P$  están dopados con aluminio, galio o indio, con sólo tres electrones en su última capa.

**26. ¿Qué ventajas presentan los circuitos integrados respecto a los circuitos convencionales?**

Son de bajo coste, pequeño tamaño, alta fiabilidad y mayor rendimiento.

**27. Explica la relación que existe entre un microprocesador y una computadora.**

En la computadora, un microprocesador se conecta a un dispositivo de memoria y se provee de dispositivos de entrada y salida.

**28. ¿Qué entiendes por nanotecnologías? ¿Qué avances pueden producirse en nanomedicina?**

Se denominan nanotecnologías a las ciencias y técnicas dedicadas al control y manipulación de la materia a una escala muy pequeña, a nivel de átomos y moléculas.

Se esperan avances médicos en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades infecciosas y metabólicas, en el tratamiento de distintos tipos de cáncer, en la corrección de patologías del sistema cardiovascular y neurológico, en microbiología, ingeniería genética, inmunología, etc.

**29. Un microscopio electrónico utiliza electrones acelerados con una diferencia de potencial de  $7,5 \cdot 10^4$  V. ¿Cuál es el poder de resolución del microscopio suponiendo que sea igual a la longitud de onda de los electrones?**

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mV_e}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 7,5 \cdot 10^4 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}} = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

## ■ Ciencia, tecnología y sociedad

**1. ¿Cómo definirías el efecto túnel?**

Una partícula atraviesa una barrera de energía superior a la propia energía de la partícula.

**2. ¿Existe alguna relación entre el efecto túnel y el Principio de incertidumbre?**

Sí. La energía de una partícula puede fluctuar ampliamente siempre que estas fluctuaciones se produzcan en un intervalo de tiempo pequeño.

**3. ¿Por qué las predicciones de la Mecánica cuántica no son aplicables en la vida cotidiana?**

Por el pequeño valor de la constante de Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J s).

**4. Selecciona la información más relevante del texto y describe tus conclusiones con un lenguaje científico.**

A realizar por cada alumno; por tanto, con conclusiones no uniformes.



## ■ Problemas propuestos

### ■ Radiación térmica. Teoría de Planck

1. **¿Qué hechos fundamentales obligaron a revisar las leyes de la Física clásica y propiciaron el nacimiento de la Física Cuántica?**

La radiación térmica, el efecto fotoeléctrico y el carácter discontinuo de los espectros atómicos.

2. **¿Qué cuantos de radiación son más energéticos, los infrarrojos o los visibles?**

Los visibles, por tener una frecuencia mayor:

$$E = hf.$$

3. **La temperatura aproximada de la superficie de una estrella es de 4 500 K, ¿qué color predominará cuando veamos la luz que emite?**

Aplicando la Ley de Wien se obtiene:

$$\lambda_{\text{máx}} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}}{4 500 \text{ K}} = 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 640 \text{ nm}$$

Esta longitud de onda corresponde a una luz roja; en consecuencia, cuando veamos la luz que emite la estrella predominará el color rojo.

4. **Una fuente de luz monocromática emite una radiación electromagnética con una longitud de onda de  $4,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  y una potencia de 20 W. ¿Cuál es la energía de cada fotón? ¿Cuántos fotones por segundo emite esta fuente?**

De acuerdo con la Hipótesis de Planck, la energía de un fotón es:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{4,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,1 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Como la fuente emite luz monocromática con una potencia de 20 J/s, el número de fotones emitidos por segundo es:

$$\frac{20 \text{ Js}^{-1}}{4,1 \cdot 10^{-19} \text{ J/fotón}} = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ fotones}$$

### ■ Efecto fotoeléctrico. Teoría de Einstein

5. **Una radiación monocromática de  $\lambda = 500 \text{ nm}$  incide sobre una fotocélula de cesio, cuyo trabajo de extracción es de 2,0 eV.**

Calcula:

- a) **La frecuencia umbral y la longitud de onda umbral de la fotocélula.**

- b) **La energía cinética de los electrones emitidos.**

- a) La frecuencia umbral es la que corresponde al trabajo de extracción o función trabajo:

$$W_e = hf_0$$

$$f_0 = \frac{W_e}{h} = \frac{2 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 4,8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4,8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

- b) De acuerdo con la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico, se cumple:

$$E_c = hf - W_e = \frac{hc}{\lambda} - W_e =$$

$$= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} - 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} =$$

$$= 7,8 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,49 \text{ eV}$$

6. **Un haz de luz monocromática de  $6,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  ilumina una superficie metálica que emite electrones con una energía cinética de  $1,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . ¿Cuál es el trabajo de extracción del metal? ¿Cuál es su frecuencia umbral?**

La energía del fotón incidente es:

$$E = hf = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 6,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 4,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Por tanto, el trabajo de extracción del metal es:

$$W_e = E - E_c = 4,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} - 1,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La frecuencia umbral es:

$$f_0 = \frac{W_e}{h} = \frac{3 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

7. **Los fotoelectrones emitidos por una superficie metálica tienen una energía cinética máxima de 2,03 eV para una radiación incidente de 300 nm de longitud de onda. Halla la función de trabajo de la superficie y la longitud de onda umbral.**

La función trabajo o trabajo de extracción se obtiene mediante la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

$$hf = E_c + W_e$$

$$E_c = 2,03 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 3,25 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$W_e = \frac{hc}{\lambda} - E_c =$$

$$= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{3 \cdot 10^{-7} \text{ m}} - 3,25 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La frecuencia umbral es la que corresponde al trabajo de extracción:

$$W_e = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}; \quad \lambda_0 = \frac{hc}{W_e} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}} =$$

$$= 5,88 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 588 \text{ nm}$$

8. **Supongamos que se ilumina el mismo metal con dos focos de la misma luz monocromática de 100 y 400 W, respectivamente. ¿Cuál de los dos producirá mayor número de fotoelectrones? ¿Qué fotoelectrones abandonarán el metal con más energía?**

El foco de mayor potencia produce más fotoelectrones.

La energía con que los fotoelectrones abandonan el metal es la misma en ambos casos: se ilumina el mismo metal (igual trabajo de extracción) con la misma luz monocromática (igual frecuencia).



**9. Si se duplica la frecuencia de la radiación que incide sobre la superficie de un metal, ¿se duplica la energía cinética máxima de los electrones extraídos?**

La energía del fotón incidente es igual al trabajo de extracción más la energía cinética del electrón; por consiguiente, si se duplica la frecuencia no se duplica la energía cinética de los electrones extraídos, ya que el trabajo de extracción no varía:

$$E = W_e + E_c; \quad hf = hf_0 + E_c$$

La energía cinética será, en cualquier caso, más del doble de la inicial.

**10. Si el trabajo de extracción de una superficie de potasio es igual a 2,2 eV, ¿se podría utilizar el potasio en células fotoeléctricas para funcionar con luz visible? En caso afirmativo, ¿cuánto vale la velocidad máxima de salida de los fotoelectrones?**

**Dato: frecuencia máxima de la luz visible,  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz.**

La frecuencia umbral es la que corresponde al trabajo de extracción:

$$f_0 = \frac{W_e}{h} = \frac{2,2 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 5,3 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Esta frecuencia corresponde a una luz verde, por tanto, el potasio sí se podría utilizar en células fotoeléctricas que funcionasen con luz visible.

La velocidad máxima de salida de los fotoelectrones se obtiene utilizando luz visible de máxima frecuencia, es decir, luz violeta. La energía cinética máxima de los fotoelectrones es:

$$\begin{aligned} E_c &= hf - W_e = \\ &= (6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 7,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}) - (2,2 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = \\ &= 1,45 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,45 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 5,7 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

**11. La longitud de onda umbral de un cierto metal es de 275 nm.**

**Calcula:**

**a) La función de trabajo o energía de extracción de los electrones, en eV, de ese metal.**

**b) La velocidad máxima de los fotoelectrones producidos si se emplea una radiación de 220 nm de longitud de onda.**

a) La energía de extracción de los electrones es la energía del fotón de longitud de onda umbral:

$$\begin{aligned} W_e = hf_0 &= \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,75 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = \\ &= 7,23 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \frac{7,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 4,52 \text{ eV} \end{aligned}$$

b) La energía cinética de los electrones se calcula mediante la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{hc}{\lambda} - W_e = \\ &= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,20 \cdot 10^{-7} \text{ m}} - 7,23 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \\ &= 1,81 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

La velocidad máxima de los fotoelectrones se obtiene a partir de la energía cinética:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,81 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 6,3 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

**12. Un material iluminado con luz de frecuencia  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz emite fotoelectrones cuyo potencial de frenado es igual a 0,70 V. Luego se cambia la frecuencia de la luz y el nuevo potencial de frenado es 1,45 V. ¿Cuál es la frecuencia de la segunda luz?**

El potencial de frenado ( $V_0$ ) y la energía cinética se relacionan según la ecuación  $E_c = eV_0$ . Por tanto, la ecuación del efecto fotoeléctrico para ambas frecuencias es:

$$hf_1 = eV_{01} + W_e; \quad hf_2 = eV_{02} + W_e$$

Restando ambas ecuaciones se obtiene:

$$hf_2 - hf_1 = e(V_{02} - V_{01}); \quad f_2 = \frac{e(V_{02} - V_{01})}{h} + f_1$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot (1,45 \text{ V} - 0,79 \text{ V})}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} + 7,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = \\ &= 9,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned}$$

**13. Si el trabajo de extracción de la superficie de un determinado material es de 2,07 eV:**

**a) ¿En qué rango de longitudes de onda del espectro visible puede utilizarse este material en células fotoeléctricas? Las longitudes de onda de la luz visible están comprendidas entre 380 nm y 775 nm.**

**b) Calcula la velocidad de extracción de los electrones emitidos para una longitud de onda de 400 nm.**

a) A partir de la frecuencia umbral (frecuencia mínima necesaria para que se produzca el efecto fotoeléctrico), se obtiene la longitud de onda máxima que produce este efecto:

$$W_e = hf_0 = \frac{hc}{f \lambda_{\text{máx}}}$$

$$2,07 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{\lambda_{\text{máx}}}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 600 \text{ nm}$$

Como las longitudes de onda de la luz visible están comprendidas entre 380 y 775 nm, el efecto fotoeléctrico se producirá con luces visibles cuya longitud de onda esté comprendida entre 380 y 600 nm.

b) A partir de la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico, se obtiene:

$$E = W_e + E_c; \quad \frac{hc}{\lambda} = W_e + \frac{1}{2} m v^2$$

$$\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{400 \cdot 10^{-9} \text{ m}} =$$

$$= 2,07 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} + \frac{1}{2} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot v^2$$

$$v = 6,04 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$$



## Espectros atómicos. El átomo de Bohr

14. ¿Por qué el espectro del hidrógeno tiene muchas líneas si el átomo de hidrógeno tiene un solo electrón?

El electrón puede saltar entre distintos niveles de energía y en una muestra de hidrógeno existen numerosísimos átomos en diversos estados de energía.

15. Calcula la longitud de onda de la tercera línea de la serie de Lyman en el espectro del hidrógeno.

Para la tercera línea de la serie de Lyman,  $n_1 = 1$  y  $n_2 = 4$ :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 1,09677 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \cdot \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2} \right) =$$

$$= 1,03 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}; \quad \lambda = 9,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

16. La longitud de onda de una de las rayas amarillas del espectro visible del sodio es de 589 nm. Calcula la diferencia de energía entre los niveles electrónicos del átomo de sodio correspondientes a esta transición.

$$E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}} =$$

$$= 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

17. ¿Cuál es la mínima cantidad de energía que debe absorber un átomo de hidrógeno para pasar de su estado fundamental al primer estado excitado? Si la energía se suministra en forma de radiación electromagnética, ¿cuál es la longitud de onda de la radiación necesaria? ¿Qué tipo de onda electromagnética es?

En el estado fundamental  $n_1 = 1$  y en el primer estado excitado  $n_2 = 2$ :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 1,09677 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \cdot \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) =$$

$$= 8,23 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}; \quad \lambda = 1,22 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 122 \text{ nm}$$

Esta longitud de onda corresponde a una radiación ultravioleta.

La energía necesaria es:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{1,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}} =$$

$$= 1,64 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

## Dualidad onda-corpúsculo. Hipótesis de De Broglie

18. Un haz monocromático de luz roja posee una longitud de onda de 650 nm.

Calcula:

- La frecuencia.
- La energía de un fotón.
- La cantidad de movimiento de ese fotón.

$$a) f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,62 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$b) E = hf = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 4,62 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 3,05 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$c) \lambda = \frac{h}{p}; \quad p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 1,02 \cdot 10^{-27} \text{ kg ms}^{-1}$$

19. Calcula la longitud de onda asociada a un electrón que posee una energía cinética de 150 eV. Dato: masa del electrón =  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

El momento lineal del electrón a partir de su energía cinética es:  $mv = \sqrt{2 m E_c}$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 m E_c}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 150 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J eV}^{-1}}} =$$

$$= 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Esta longitud de onda corresponde a la zona de rayos X.

20. En relación con las longitudes de onda de De Broglie asociadas a un electrón y a un protón, razona cuál es menor si tienen:

a) El mismo módulo de la velocidad.

b) La misma energía cinética. No se tienen en cuenta los posibles efectos relativistas.

a) Las longitudes de onda de De Broglie asociadas a un electrón y un protón son:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}; \quad \lambda_p = \frac{h}{m_p v_p}$$

Si las velocidades del electrón y del protón son iguales, se obtiene:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{m_p}{m_e}$$

y como:

$$m_p > m_e \Rightarrow \lambda_e > \lambda_p$$

b) Las longitudes de onda de De Broglie son:

$$\lambda_e = \frac{h}{\sqrt{2 m_e E_c}}; \quad \lambda_p = \frac{h}{\sqrt{2 m_p E_c}}$$

Si tienen la misma energía cinética, al dividir ambas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{\sqrt{m_p}}{\sqrt{m_e}}$$

y como:

$$\sqrt{m_p} > \sqrt{m_e} \Rightarrow \lambda_e > \lambda_p$$

21. Las partículas  $\alpha$  son núcleos de helio, de masa cuatro veces la del protón, aproximadamente. Si una partícula  $\alpha$  y un protón, que poseen la misma energía cinética, se mueven a velocidades mucho menores que la luz, ¿qué relación existe entre las longitudes de onda de De Broglie correspondientes a las dos partículas?

Como ambas partículas poseen la misma energía cinética, se cumple:



$$\frac{m_p v_p^2}{2} = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2}; \quad m_\alpha = 4m_p; \quad m_p v_p^2 = 4m_p v_\alpha^2; \quad v_p = 2v_\alpha$$

La relación entre las longitudes de onda de De Broglie es:

$$\lambda_p = \frac{h}{m_p v_p}; \quad \lambda_\alpha = \frac{h}{m_\alpha v_\alpha}; \quad \frac{\lambda_p}{\lambda_\alpha} = \frac{m_\alpha v_\alpha}{m_p v_p} = \frac{4m_p v_\alpha}{m_p 2v_\alpha} = 2$$

$$\lambda_p = 2\lambda_\alpha$$

La longitud de onda asociada al protón es el doble que la asociada a la partícula alfa.

**22. Un protón que parte del reposo es acelerado por una diferencia de potencial de 10 V. Determina:**

- La energía que adquiere el protón expresada en eV y su velocidad en m/s.
- La longitud de onda de De Broglie asociada al protón con la velocidad anterior.

**Datos:**  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ;  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  
 $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

- La energía que adquiere el protón coincide con el trabajo que realiza el campo eléctrico:

$$E_c = qV = 1 \text{ e} \cdot 10 \text{ V} = 10 \text{ eV} = 10 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J eV}^{-1} = 1,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

- La longitud de onda de De Broglie es la siguiente:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 4,38 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}} = 9,06 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

## Principio de incertidumbre de Heisenberg

**23. Las velocidades de un electrón y de una bala de 30 g se miden con una indeterminación en ambos casos de  $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ . Según el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, ¿cuáles son las indeterminaciones en el conocimiento de su posición?**

**Dato:** masa del electrón =  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

De acuerdo con el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, se cumple:

Para el electrón:

$$\Delta x \geq \frac{h}{2\pi \cdot \Delta p} \geq \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,28 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}} \geq 0,12 \text{ m}$$

Para la bala:

$$\Delta x \geq \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,28 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}} \geq 3,5 \cdot 10^{-30} \text{ m}$$

**24. Un grano de arena de masa 1 mg se mueve con una velocidad de 20 m/s. Si la indeterminación en su posición es de  $10^{-7} \text{ m}$ , ¿cuál es la mínima indeterminación en su velocidad? Analiza el resultado.**

De acuerdo con el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, se cumple:

$$\Delta v \geq \frac{h}{2\pi \cdot \Delta x \cdot m} \geq \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,28 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot 10^{-6} \text{ kg}} \geq 1,1 \cdot 10^{-21} \text{ m s}^{-1}$$

Aunque la indeterminación en la posición es muy pequeña a escala macroscópica, la indeterminación en la velocidad es tan pequeña que resulta completamente despreciable.

## Función de onda y probabilidad

**25. ¿Por qué el concepto de órbita electrónica carece de sentido en la Mecánica Cuántica?**

Si no es posible determinar la posición y la velocidad de un electrón en un instante determinado, no es posible mantener el concepto de trayectoria y no tiene sentido hablar de órbitas electrónicas en los átomos.

**26. ¿Qué relación existe entre la nube de probabilidades y la densidad electrónica?**

Cuanto mayor es la probabilidad de encontrar el electrón, mayor es la densidad electrónica.

**27. Indica el valor de los números cuánticos  $n$ ,  $l$  y  $m_l$  en el orbital atómico  $4d$ .**

$$n = 4, \quad l = 3, \quad m_l = 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3$$

**28. ¿Qué diferencias existen entre la emisión espontánea y la emisión estimulada de radiación?**

La emisión espontánea de radiación se produce cuando los átomos excitados caen a un nivel de energía más bajo y emiten fotones espontáneamente. Por ser un proceso aleatorio, los fotones emitidos no son coherentes, es decir, no están en fase los unos con los otros.

En el proceso de emisión estimulada de radiación, la emisión se produce cuando hay más átomos en el nivel superior de energía que en el inferior (inversión de población). Esto se consigue, generalmente, mediante una luz de frecuencia adecuada. En este caso, se produce un haz intenso de luz de una sola frecuencia, estando todas las ondas en fase entre sí (luz coherente).

**29. Un láser de longitud de onda  $\lambda = 650 \text{ nm}$  tiene una potencia de 12 mW y un diámetro de haz de 0,82 mm. Calcula:**

**a) La intensidad del haz.**

**b) El número de fotones por segundo que viajan con el haz.**

**a)** La intensidad del haz es:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{3,14 \cdot (4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m})^2} = 2,3 \cdot 10^4 \text{ W m}^{-2}$$

**b)** La energía de un fotón del láser es:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,1 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La intensidad del haz considerando los fotones es la siguiente:

$$I = \frac{2,3 \cdot 10^4 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2}}{3,1 \cdot 10^{-19} \text{ J/fotón}} = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ fotones s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

El número de fotones por segundo que viajan con el haz es:

$$\begin{aligned} N \cdot \text{o de fotones} &= IA = I\pi r^2 = \\ &7,4 \cdot 10^{22} \text{ fotones s}^{-1} \text{m}^{-2} \cdot 3,14 (4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m})^2 = \\ &= 3,9 \cdot 10^{16} \text{ fotones/s} \end{aligned}$$

- 30. Un microscopio electrónico utiliza electrones de 50 keV. ¿Cuál es el poder de resolución del microscopio suponiendo que sea igual a la longitud de onda de los electrones?**

La longitud de onda asociada a los electrones es:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{\sqrt{2mVe}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 5 \cdot 10^4 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}} = \\ &= 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ m} \end{aligned}$$

- 31. Un láser de He-Ne emite fotones con energías de  $3,20 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . ¿Cuál es el color de la luz de este láser?**

La frecuencia de la luz del láser es:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{3,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 4,83 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Esta frecuencia corresponde a una luz roja.

- 32. Una fuente luminosa cuya potencia es de 20 W emite luz de  $1,0 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$  de frecuencia en todas direcciones. Si una célula fotoeléctrica está situada a 2,0 m de distancia del foco luminoso, ¿cuántos fotones inciden por segundo en el cátodo de la fotocélula, si este tiene una superficie de  $10 \text{ cm}^2$ ?**

La potencia que incide sobre los  $10 \text{ cm}^2$  del cátodo, situado a 2 m de distancia, es:

$$P = 20 \text{ Js}^{-1} \cdot \frac{10^{-3} \text{ m}^2}{4\pi \cdot 2^2 \text{ m}^2} = 3,98 \cdot 10^{-4} \text{ J/s}$$

La energía de un fotón es:

$$E = hf = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} = 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

El número de fotones que inciden por segundo será:

$$\frac{3,98 \cdot 10^{-4} \text{ Js}^{-1}}{6,63 \cdot 10^{-19} \text{ J/fotón}} = 6,0 \cdot 10^{14} \text{ fotones/s}$$

- 33. Responde a las siguientes preguntas:**

a) ¿Qué velocidad ha de tener un electrón para que su longitud de onda de De Broglie sea 400 veces mayor que la de un neutrón de 6,0 eV de energía cinética?

b) ¿Se puede considerar que a esa velocidad el electrón es no relativista?

a) Las longitudes de onda asociadas al electrón y al neutrón son:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}; \quad \lambda_n = \frac{h}{\sqrt{2E_{cn} m_n}}$$

Como:

$$\begin{aligned} \lambda_e &= \frac{h}{m_e v_e} = 400 \frac{h}{\sqrt{2E_{cn} m_n}}; & v_e &= \frac{\sqrt{2E_{cn} m_n}}{400 m_e} \\ v_e &= \frac{\sqrt{2 \cdot 6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}}{400 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = \\ &= 1,6 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

b) La velocidad del electrón puede considerarse no relativista, puesto que es mucho menor que la velocidad de la luz.

- 34. 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) Determina 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. Razona 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.

a) Ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

$$\begin{aligned} E &= W_e - E_c = \\ &= W_e \frac{hc}{\lambda} - eV_0 = \\ &= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{280 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,3 \text{ J C}^{-1}; \\ W_e &= 5,02 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

b) De acuerdo con la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico, si al oxidarse el metal disminuye el potencial de frenado se debe a que la energía cinética máxima de los fotoelectrones ha disminuido y, por tanto, ha aumentado el trabajo de extracción o función trabajo. En consecuencia, también habrá aumentado la frecuencia umbral.

- 35. La frecuencia umbral de un metal es de  $4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ . Calcula el trabajo de extracción, la energía cinética de los electrones emitidos si se ilumina el metal con luz de 170 nm de longitud de onda y la longitud de onda asociada a los electrones emitidos.**

$$W_e = hf_0 = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 3,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\begin{aligned} E_c = E - W_e &= \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{170 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 3,0 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \\ &= 8,70 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 8,70 \cdot 10^{-19} \text{ J}}} = 5,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$