

Bloque 4.2

Física Cuántica

Apuntes completos para la PAU: hipótesis de Planck, efecto fotoeléctrico de Einstein (ecuación, trabajo de extracción, frecuencia umbral, potencial de frenado), dualidad onda-corpúsculo y longitud de onda de De Broglie, principio de incertidumbre de Heisenberg. Diagramas, cuadros resumen y once ejercicios resueltos paso a paso.

Contenido

4.2 Física Cuántica y Mecánica Ondulatoria

Planck, efecto fotoeléctrico, De Broglie, Heisenberg, dualidad onda-corpúsculo

Apuntes de preparación para la PAU · 2.º de Bachillerato

Ejemplar de muestra gratuito, igual para todos. Prohibida su venta o redistribución sin permiso escrito del titular.

© 2026 PAUmode. Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial, la distribución, la comunicación pública y la transformación de esta obra sin autorización escrita del titular. El incumplimiento podrá dar lugar a las acciones civiles y penales previstas en la legislación sobre propiedad intelectual.

4.2 Física Cuántica

4.2 Cuántica · Planck · Efecto fotoeléctrico · De Broglie · Heisenberg.

4.2.1 · Problemas de la física clásica: el cuerpo negro y Planck

A finales del siglo XIX, la física clásica no podía explicar el espectro de radiación de un **cuerpo negro** (objeto que absorbe y emite toda la radiación). La teoría clásica predecía una intensidad que crecía infinitamente para longitudes de onda cortas (la llamada "catástrofe ultravioleta"), mientras que el experimento mostraba que la intensidad pasa por un máximo y luego cae hasta cero.

En 1900, Max **Planck** propuso que la energía de la radiación electromagnética **no es continua** sino que se emite y absorbe en paquetes discretos llamados **cuantos**. Cada cuanto tiene una energía proporcional a la frecuencia:

$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \text{ (energía de un fotón)}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ (constante de Planck)}$$

f = frecuencia de la radiación (Hz)

λ = longitud de onda (m)

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \text{ (velocidad de la luz en el vacío)}$$

$$\text{Ley de Wien: } \lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Ley de Wien en la PAU. La ley de Wien relaciona la longitud de onda del máximo de emisión con la temperatura del cuerpo. El Sol ($T \approx 5800 \text{ K}$) emite el máximo a $\lambda_{\text{max}} \approx 500 \text{ nm}$ (luz verde-azulada, en el centro del espectro visible). Un hierro al rojo tiene $T \approx 1000 \text{ K}$ y emite el máximo hacia los 2900 nm , ya fuera del visible, en el infrarrojo: lo que vemos del hierro es solo la cola de su emisión.

4.2.2 · Efecto fotoeléctrico (Einstein, 1905)

El **efecto fotoeléctrico** consiste en la emisión de electrones de un metal cuando se ilumina con luz de frecuencia suficientemente alta. La física clásica lo explicaba al revés de como sale: si la luz fuese una onda que entrega energía de forma continua, subir la intensidad tendría que

aumentar la energía de los electrones arrancados, y con luz débil bastaría con esperar un rato a que se acumulase la energía necesaria. El experimento dice lo contrario: por debajo de cierta frecuencia no sale ni un electrón, por mucha intensidad que se ponga, y por encima de ella salen al instante. Einstein lo explicó en 1905 con la hipótesis de Planck: la luz llega en fotones y cada fotón entrega TODA su energía a UN solo electrón.

$$hf = W_0 + E_{k,\max} \text{ (ecuación de Einstein)}$$

hf = energía del fotón incidente

W_0 = trabajo de extracción (o función de trabajo):

energía mínima para arrancar un electrón del metal

$$E_{k,\max} = (1/2)mv_{\max}^2 = \text{energía cinética máxima del electrón emitido}$$

Frecuencia umbral: $f_0 = W_0 / h$ (si $f < f_0$ no hay efecto)

Longitud de onda umbral: $\lambda_0 = c / f_0 = h \cdot c / W_0$

Potencial de frenado: $e \cdot V_s = E_{k,\max}$ (V_s en voltios)

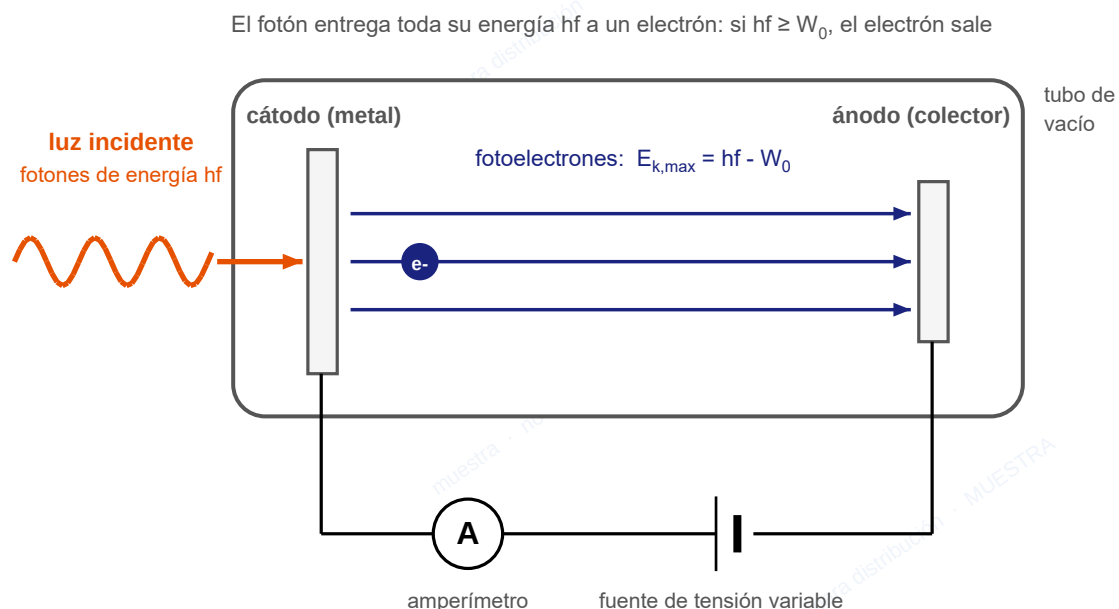


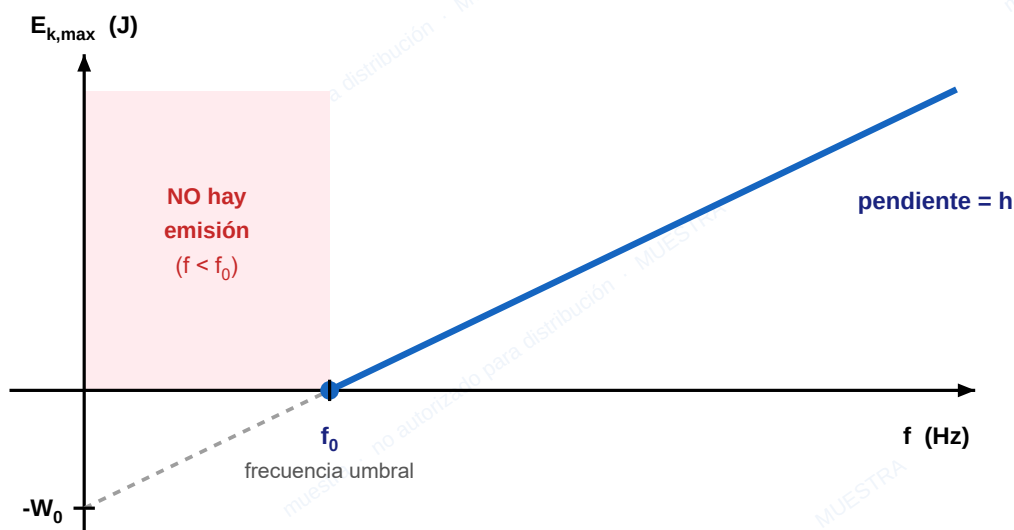
Figura 1 - La célula fotoeléctrica, que es el montaje con el que se mide todo esto. La luz entra por el vidrio e ilumina el cátodo; si $hf \geq W_0$ salen electrones que cruzan el vacío hasta el ánodo y cierran el circuito, y el amperímetro marca esa corriente. Invertiendo la fuente de tensión hasta que la corriente se anula se mide el potencial de frenado. Si $hf < W_0$, no importa la intensidad: no sale ningún electrón.

Error típico. La intensidad de la luz NO determina si hay efecto fotoeléctrico: lo que importa es la frecuencia f (o la longitud de onda). Una luz muy intensa de baja frecuencia no arranca ningún electrón. Una luz tenue de alta frecuencia SÍ puede arrancarlos.

PAU - Atención. El potencial de frenado V_s es el voltaje que hay que aplicar para detener los electrones más rápidos. Se cumple: $e \cdot V_s = E_{k,max}$. Si la E_k se expresa en eV, el potencial de frenado en voltios sale con el mismo número: $E_k = 2 \text{ eV} \Rightarrow V_s = 2 \text{ V}$. Cuidado: eso vale por el valor numérico, no porque el voltio y el electronvoltio sean la misma unidad.

Las tres leyes de la emisión fotoeléctrica, que es como lo pide el examen cuando la pregunta es teórica:

1. Cada metal tiene su propia frecuencia umbral f_0 . Por debajo de ella no hay emisión, sea cual sea la intensidad y el tiempo que se ilumine.
2. Por encima de f_0 , la energía cinética máxima de los electrones depende solo de la frecuencia de la luz, y crece linealmente con ella.
3. El número de electrones emitidos por segundo sí es proporcional a la intensidad de la luz, porque más intensidad son más fotones por segundo.



A la izquierda de f_0 no sale ningún electrón, por intensa que sea la luz.
La recta es $E_{k,max} = h \cdot f - W_0$: su pendiente vale h y corta el eje en $f_0 = W_0/h$.

Figura 2 - La segunda ley, dibujada. Al representar la energía cinética máxima frente a la frecuencia sale una recta: corta el eje de frecuencias justo en la frecuencia umbral f_0 , su pendiente es la constante de Planck h y su prolongación (la línea de puntos) corta el eje vertical en $-W_0$. A la izquierda de f_0 , en rojo, no hay emisión.

4.2.3 · Dualidad onda-corpúsculo: hipótesis de De Broglie

Si la luz, que era una onda, se comporta como partícula (el fotón), **Louis de Broglie** propuso en 1924 lo simétrico: que las partículas materiales, los electrones por ejemplo, también deben tener comportamiento ondulatorio. A cada partícula de momento lineal p le asoció una **longitud de onda de De Broglie**:

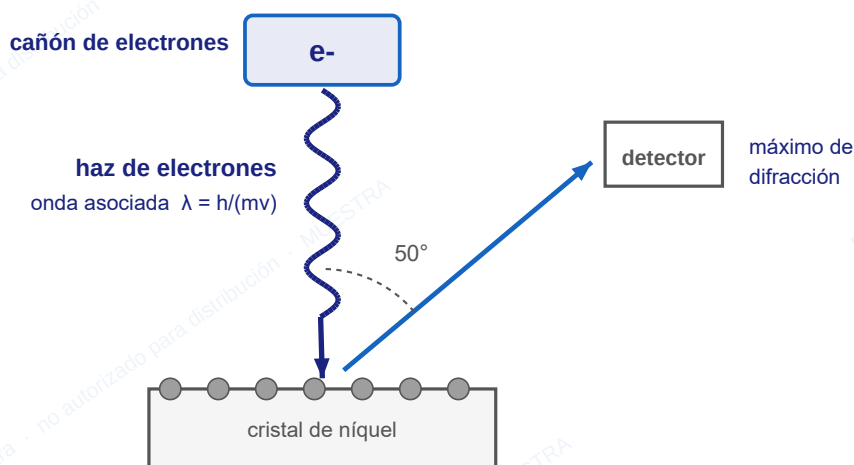
$$\lambda = h / p = h / (mv) \text{ (longitud de onda de De Broglie)}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \text{ (constante de Planck)}$$

$$p = mv = \text{momento lineal (kg}\cdot\text{m/s)}$$

Cuanto mayor la velocidad (o la masa), menor la longitud de onda.

Los electrones la tienen del orden del ángstrom (10^{-10} m).



El detector solo encuentra electrones en ciertos ángulos: solo las ondas se difractan.

Figura 3 - La prueba de que la hipótesis es cierta. Davisson y Germer (1927) lanzaron un haz de electrones perpendicular a un cristal de níquel y, en lugar de rebotar en todas direcciones, los electrones salieron concentrados en unos ángulos concretos: a 54 V de aceleración, el máximo aparecía a 50° . Difractarse es cosa de ondas, y la longitud de onda que salía de esos ángulos era la que predice $\lambda = h/(mv)$.

Truco. Si el enunciado da la energía cinética E_k en vez de la velocidad, no hace falta despejar v : como $E_k = p^2/(2m)$, sale directamente $p = \sqrt{2mE_k}$ y luego $\lambda = h/p$. Un objeto de tamaño normal tiene λ tan pequeña (del orden de 10^{-34} m) que su comportamiento ondulatorio es imposible de observar: por eso la dualidad solo se nota en partículas de masa muy pequeña.

4.2.4 · Principio de incertidumbre de Heisenberg

En 1927, Werner **Heisenberg** estableció que es **imposible** conocer simultáneamente y con precisión arbitraria la posición y el momento de una partícula: cuanto mejor se determina una, peor queda determinada la otra. Esta incertidumbre no es un fallo del instrumento de medida, es una propiedad de la propia naturaleza cuántica:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h / (4\pi) \text{ (principio de incertidumbre posición-momento)}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h / (4\pi) \text{ (principio de incertidumbre energía-tiempo)}$$

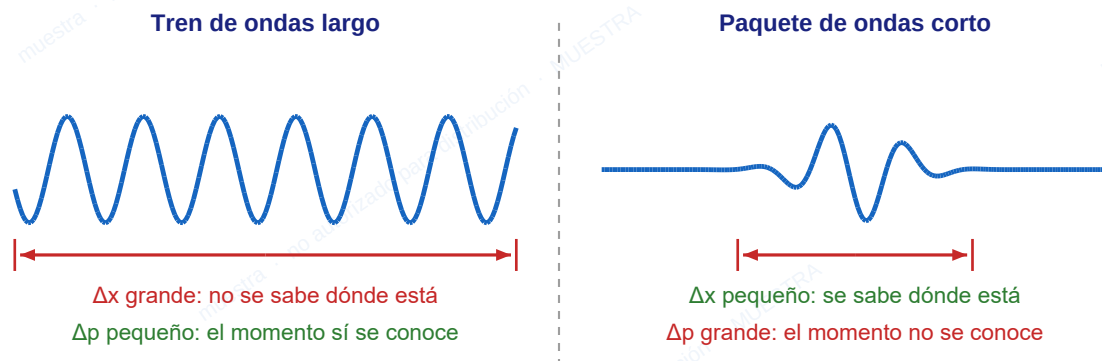
Δx = incertidumbre en la posición

Δp = incertidumbre en el momento lineal

ΔE = incertidumbre en la energía

Δt = tiempo que dura el estado

$$h/(4\pi) = \hbar/2 \approx 5,27 \cdot 10^{-35} \text{ J}\cdot\text{s}$$



No es un fallo del aparato de medida: estrechar una de las dos ensancha siempre la otra.

Figura 4 - Por qué no se pueden saber las dos cosas a la vez. A la izquierda, un tren de ondas largo: se le mide bien la longitud de onda, así que su momento $p = h/\lambda$ queda bien determinado, pero el electrón puede estar en cualquier punto de todo ese tramo. A la derecha, la misma onda apagada hasta dejar un paquete corto: ahora sí se sabe dónde está, pero se ha perdido la longitud de onda y con ella el momento. No hay manera de tener las dos cosas estrechas a la vez.

Consecuencias físicas del principio de incertidumbre:

Si confinamos un electrón en una región pequeña, es decir con Δx pequeño, su momento queda muy indeterminado (Δp grande) y por tanto su energía cinética es grande: el electrón se mueve muy deprisa dentro de esa región.

Este es el origen de la estabilidad del átomo: si el electrón cayera al núcleo, estaría confinado en un espacio todavía más pequeño y tendría una energía cinética enorme que lo expulsaría de

nuevo.

La relación entre energía y tiempo explica que un estado excitado que dura poco (Δt pequeño) tenga la energía mal definida (ΔE grande): por eso las rayas de un espectro tienen anchura y no son líneas infinitamente finas.

Y de aquí sale la diferencia de fondo con la física clásica. En mecánica clásica, conocidas la posición y la velocidad iniciales, el movimiento queda determinado para siempre. En mecánica cuántica eso ni siquiera se puede plantear: de una partícula no se conoce dónde está, sino la **probabilidad** de encontrarla en cada sitio. Es el paso del determinismo a la probabilidad.

Constante de Planck reducida. $\hbar = h/(2\pi) = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ se llama "h barra" o constante de Planck reducida. En estos apuntes la incertidumbre se escribe como $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/(4\pi)$.

Ejercicios - Sección 4.2

Once ejercicios tipo PAU de física cuántica. En rojo el método; en azul los cálculos numéricos.

1. Luz de frecuencia $f = 9,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ incide sobre un metal cuyo trabajo de extracción es $W_0 = 3,5 \text{ eV}$. ¿Se produce efecto fotoeléctrico? ¿Cuál es la energía cinética máxima del electrón emitido? ¿Y su velocidad máxima? Datos: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Calculamos la energía del fotón y la comparamos con W_0 . Si $hf > W_0$, hay efecto y lo que sobra se lo lleva el electrón como energía cinética: $E_k = hf - W_0$.

La energía del fotón sale directamente de la frecuencia:

$$E_{\text{fotón}} = hf = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 9,0 \cdot 10^{14} = 5,963 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Para comparar con W_0 hay que tener las dos en la misma unidad. Pasamos el trabajo de extracción a julios, que es donde no hay trampa:

$$W_0 = 3,5 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 5,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$5,963 \cdot 10^{-19} \text{ J} > 5,60 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow \text{Sí hay efecto fotoeléctrico}$$

$$E_k = hf - W_0 = 5,963 \cdot 10^{-19} - 5,60 \cdot 10^{-19} = 3,63 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$\text{En electronvoltios: } 3,63 \cdot 10^{-20} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,23 \text{ eV.}$$

La velocidad máxima se despeja de $E_k = (1/2)mv^2$:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{2E_k/m} = \sqrt{2 \cdot 3,63 \cdot 10^{-20} / 9,11 \cdot 10^{-31}} = 2,82 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

Ojo con el orden de las operaciones: restar en eV y convertir después, redondeando por el camino, da $3,68 \cdot 10^{-20}$ J en vez de $3,63 \cdot 10^{-20}$ J. Se resta en julios y se convierte al final.

Resultado final: Sí hay efecto | $E_k = 3,63 \cdot 10^{-20}$ J = 0,23 eV | $v_{\max} = 2,82 \cdot 10^5$ m/s

2. Un metal tiene un trabajo de extracción $W_0 = 4,52$ eV. ¿Cuál es su frecuencia umbral f_0 y su longitud de onda umbral λ_0 ?

La frecuencia umbral es la mínima que produce efecto fotoeléctrico: el fotón trae lo justo para arrancar el electrón y no le sobra nada, así que $hf_0 = W_0$. Despejamos f_0 , y luego $\lambda_0 = c/f_0$.

Primero el trabajo de extracción en julios, porque h está en J·s:

$$W_0 = 4,52 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 7,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$f_0 = W_0/h = 7,23 \cdot 10^{-19} / 6,626 \cdot 10^{-34} = 1,09 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

La longitud de onda umbral es la que corresponde a esa frecuencia. Es un umbral al revés: por encima de λ_0 ya no hay efecto, porque más longitud de onda es menos frecuencia.

$$\lambda_0 = c/f_0 = 3 \cdot 10^8 / 1,09 \cdot 10^{15} = 2,75 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 275 \text{ nm}$$

Resultado final: $f_0 = 1,09 \cdot 10^{15}$ Hz | $\lambda_0 = 275$ nm (ultravioleta)

3. Se ilumina un metal con luz de $\lambda = 300$ nm y los electrones emitidos tienen una energía cinética máxima $E_k = 2,0$ eV. Calcula: (a) el potencial de frenado V_s ; (b) el trabajo de extracción del metal.

El potencial de frenado es el voltaje que detiene justo a los electrones más rápidos: todo lo que traían de energía cinética lo gastan subiendo esa diferencia de potencial, o sea $e \cdot V_s = E_k$. Para el apartado (b) despejamos W_0 de la ecuación de Einstein.

$$(a) e \cdot V_s = E_k \Rightarrow V_s = E_k/e = 2,0 \text{ eV} / e = 2,0 \text{ V}$$

Si E_k se expresa en eV, el potencial de frenado en voltios sale con el mismo número. Es un atajo muy útil.

(b) Necesitamos la energía del fotón que llega. Con $\lambda = 300 \text{ nm} = 3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$:

$$E = hc/\lambda = (6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / 3,0 \cdot 10^{-7} = 6,626 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,14 \text{ eV}$$

De la ecuación de Einstein, el trabajo de extracción es lo que el fotón gasta en arrancar el electrón, es decir lo que no acaba en energía cinética. Restamos en julios, que es donde no se acumulan redondeos ($E_k = 2,0 \text{ eV} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$):

$$W_0 = hf - E_k = 6,626 \cdot 10^{-19} - 3,2 \cdot 10^{-19} = 3,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

En electronvoltios: $3,43 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,14 \text{ eV}$.

Resultado final: $V_s = 2,0 \text{ V} \mid W_0 = 2,14 \text{ eV} = 3,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

4. Calcula la energía de un fotón de luz verde con longitud de onda $\lambda = 500 \text{ nm}$. Expresa en J y en eV.

Usamos $E = hc/\lambda$. Primero convertimos nm a metros.

$$\lambda = 500 \text{ nm} = 500 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$E = hc/\lambda = (6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / 5,0 \cdot 10^{-7}$$

$$E = 1,9878 \cdot 10^{-25} / 5,0 \cdot 10^{-7} = 3,98 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Para pasarlo a electronvoltios se divide entre la carga del electrón, que es lo que vale un eV en julios. Se divide el valor sin redondear, $3,976 \cdot 10^{-19} \text{ J}$:

$$\text{En eV: } 3,976 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,48 \text{ eV}$$

Resultado final: $E = 3,98 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,48 \text{ eV}$

5. Calcula la longitud de onda de De Broglie de un electrón ($m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) que se mueve a $v = 2,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$.

Aplicamos $\lambda = h/(mv)$. Calculamos primero el momento lineal, que es lo que entra en la fórmula.

El momento lineal es masa por velocidad:

$$p = mv = 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 2,0 \cdot 10^6 = 1,822 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\lambda = h/p = 6,626 \cdot 10^{-34} / 1,822 \cdot 10^{-24} = 3,64 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,364 \text{ nm}$$

Sale del orden del ángstrom (10^{-10} m), que es la distancia entre átomos en un cristal. Por eso un cristal difracta electrones: le hace de red de difracción.

Resultado final: $\lambda = 3,64 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,364 \text{ nm}$

6. Un electrón está confinado en una región de $\Delta x = 1,0 \cdot 10^{-10}$ m (orden del átomo). ¿Cuál es la incertidumbre mínima en su momento Δp ? ¿Y en su velocidad Δv ?

Principio de incertidumbre: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$. La incertidumbre mínima se obtiene con el signo igual.

Despejamos Δp poniendo el signo igual, que es el caso límite: cualquier otro valor sería mayor.

$$\Delta p = h / (4\pi \cdot \Delta x) = 6,626 \cdot 10^{-34} / (4\pi \cdot 1,0 \cdot 10^{-10})$$

$$\Delta p = 6,626 \cdot 10^{-34} / 1,257 \cdot 10^{-9} = 5,27 \cdot 10^{-25} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

La incertidumbre en la velocidad sale de la del momento dividiendo por la masa, que sí conocemos con precisión:

$$\Delta v = \Delta p / m = 5,27 \cdot 10^{-25} / 9,11 \cdot 10^{-31} = 5,79 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

La incertidumbre en la velocidad sale enorme, del orden de la velocidad misma. Encerrar un electrón en un átomo obliga a que se mueva muy deprisa: esa es la lectura física del resultado.

Resultado final: $\Delta p \geq 5,27 \cdot 10^{-25} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ | $\Delta v \geq 5,79 \cdot 10^5 \text{ m/s}$

7. Se ilumina cesio ($W_0 = 2,1 \text{ eV}$) con luz de $\lambda = 350 \text{ nm}$. Calcula: (a) energía del fotón, (b) E_k máxima, (c) potencial de frenado.

Problema completo de efecto fotoeléctrico. Van siempre los mismos tres pasos, en este orden: energía del fotón, $E_k = E - W_0$, y $V_s = E_k/e$.

(a) La energía del fotón, a partir de la longitud de onda:

$$E = hc/\lambda = (6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) / 350 \cdot 10^{-9} = 5,68 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,55 \text{ eV}$$

(b) $3,55 \text{ eV} > 2,1 \text{ eV}$, así que hay efecto. Lo que sobra es la energía cinética. Como en los ejercicios 1 y 3, la resta se hace en julios y se convierte al final, para no arrastrar el redondeo de los $3,55 \text{ eV}$. El trabajo de extracción en julios es $W_0 = 2,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,36 \cdot 10^{-19} \text{ J}$:

$$E_k = hf - W_0 = 5,68 \cdot 10^{-19} - 3,36 \cdot 10^{-19} = 2,32 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

En electronvoltios: $2,32 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,45 \text{ eV}$.

(c) El potencial de frenado, con E_k ya en electronvoltios:

$$V_s = E_k/e = 1,45 \text{ V}$$

Resultado final: $E = 3,55 \text{ eV}$ | $E_k = 1,45 \text{ eV}$ | $V_s = 1,45 \text{ V}$

8. Un protón ($m = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg) tiene una longitud de onda de De Broglie de $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-10}$ m. ¿Cuánto vale su velocidad?

Es el problema de De Broglie al revés: nos dan λ y piden la velocidad. Despejamos v de $\lambda = h/(mv)$, o sea $v = h/(m\lambda)$.

$$v = h / (m\lambda) = 6,626 \cdot 10^{-34} / (1,673 \cdot 10^{-27} \cdot 1,0 \cdot 10^{-10})$$

$$v = 6,626 \cdot 10^{-34} / 1,673 \cdot 10^{-37} = 3,96 \cdot 10^3 \text{ m/s} = 3,96 \text{ km/s}$$

Compara con el ejercicio 5: para la misma longitud de onda, el protón va mucho más despacio que el electrón porque tiene casi 2000 veces más masa. Lo que fija λ es el producto mv , no la velocidad sola.

Resultado final: $v = 3,96 \cdot 10^3$ m/s

9. La superficie del Sol tiene temperatura $T = 5778$ K. ¿A qué longitud de onda emite el máximo de radiación? ¿En qué zona del espectro se encuentra? Dato: cte. Wien = $2,898 \cdot 10^{-3}$ m·K.

Ley de Wien: $\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. Despejamos $\lambda_{\max}$.

$$\lambda_{\max} = 2,898 \cdot 10^{-3} / T = 2,898 \cdot 10^{-3} / 5778$$

$$\lambda_{\max} = 5,02 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 502 \text{ nm}$$

El espectro visible va de 380 nm (violeta) a 750 nm (rojo). 502 nm es luz verde-azulada: el máximo cae en el centro del espectro visible, que es justo donde mejor ve el ojo humano.

Resultado final: $\lambda_{\max} = 5,02 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 502 \text{ nm}$ (centro del espectro visible)

10. Un electrón tiene energía cinética $E_k = 100$ eV. Calcula su longitud de onda de De Broglie. Dato: $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg.

Con la energía cinética calculamos el momento: $E_k = p^2/(2m) \Rightarrow p = \sqrt{2mE_k}$. Luego $\lambda = h/p$.

Lo primero, la energía a julios: en el sistema internacional no se puede trabajar con electronvoltios.

$$E_k = 100 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

$$p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-17}}$$

$$p = \sqrt{2,916 \cdot 10^{-47}} = 5,40 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\lambda = h/p = 6,626 \cdot 10^{-34} / 5,40 \cdot 10^{-24} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,123 \text{ nm}$$

Resultado final: $\lambda = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,123 \text{ nm}$

11. Un átomo permanece en un estado excitado durante $\Delta t = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ antes de emitir un fotón. ¿Cuál es la indeterminación mínima en la energía de ese estado? Exprésala en julios y en electronvoltios.

Es el principio de indeterminación en su otra forma, la de energía y tiempo: $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/(4\pi)$. El tiempo que dura el estado hace de Δt , y la indeterminación mínima sale, como siempre, del signo igual.

Despejamos ΔE con el signo igual:

$$\Delta E = h / (4\pi \cdot \Delta t) = 6,626 \cdot 10^{-34} / (4\pi \cdot 1,0 \cdot 10^{-8})$$

$$\Delta E = 6,626 \cdot 10^{-34} / 1,257 \cdot 10^{-7} = 5,27 \cdot 10^{-27} \text{ J}$$

En electronvoltios, dividiendo entre la carga del electrón:

$$\Delta E = 5,27 \cdot 10^{-27} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$$

Cuanto menos dura el estado, peor definida queda su energía: por eso las rayas del espectro tienen anchura. Lo mismo vale para un núcleo: el tiempo que vive su estado excitado marca la indeterminación de la energía del fotón gamma que emite al desexcitarse.

Resultado final: $\Delta E \geq 5,27 \cdot 10^{-27} \text{ J} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$