1 ESTRUCTURA ATÓMICA DE LA MATERIA. TEORÍA CUÁNTICA

SOLUCIONES A LAS CUESTIONES DE INICIACIÓN

1. ¿Cuáles de las siguientes entidades son partículas fundamentales constituyentes del átomo?: *a)* electrón; *b)* neutrón; *c)* fotón; *d)* protón; *e)* ninguna de ellas; como su propio nombre indica, el átomo es indivisible.

Son partículas constituyentes del átomo *a)*, *b)* y *d)*.

2. Escuchamos con frecuencia datos precisos de la posición y de la velocidad que lleva un transbordador espacial en su movimiento orbital. ¿Por qué, sin embargo, no es posible dar datos precisos de dichas magnitudes en el caso de un electrón?

Porque el *principio de indeterminación de Heisenberg* establece que, en el mundo subatómico, el del electrón, las medidas de posición y velocidad llevan asociadas, respectivamente, cierto error o incertidumbre, aumentando este para una magnitud cuanto más se precisa el valor de la otra, lo que evita poder dar datos exactos de ambas magnitudes a la vez.

3. Al hablar de la estructura del átomo hemos oído muchas veces los términos órbita y orbital. ¿Son sinónimos? ¿Existe alguna diferencia entre ellos?

No. La **órbita** es un concepto de la física clásica, y se define como la trayectoria que sigue un electrón alrededor del núcleo del átomo. Por tanto, conocidas las ecuaciones del movimiento, sería posible determinar con exactitud su velocidad y su posición. Por el contrario, el concepto de **orbital** es una idea de la mecánica cuántica, y surge de la imposibilidad de conocer con precisión dichas magnitudes.

4. El que una partícula, por ejemplo, el electrón, pueda comportarse como una onda, ¿significa que no tiene masa?

No. El electrón, al igual que otras partículas, tiene una doble naturaleza: corpuscular y ondulatoria; es decir, unas veces se comporta como onda, pero otras, como partícula.

1 ESTRUCTURA ATÓMICA DE LA MATERIA. TEORÍA CUÁNTICA

SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES PROPUESTAS EN EL INTERIOR DE LA UNIDAD

1. La luz blanca está compuesta por una serie de radiaciones de diferente frecuencia. ¿Se propagan todas ellas con la misma velocidad en el vacío? ¿Y en otro medio diferente; por ejemplo, el agua?

Todas las radiaciones electromagnéticas se propagan con la misma velocidad en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. En los medios materiales, la velocidad depende de la frecuencia. En agua, la velocidad de la luz visible disminuye con la frecuencia: $v_{rojo} > v_{violeta}$.

2. ¿Qué radiación tiene mayor frecuencia, la luz roja o la luz violeta? Utilizando los datos de la figura 10, calcula cuánto valen la frecuencia máxima de la luz violeta y la frecuencia mínima de la luz roja.

La luz roja tiene una longitud de onda más larga que la violeta; por tanto, su frecuencia es menor. Tomando como extremos para luz roja $\lambda = 780$ nm y para la violeta $\lambda = 380$ nm, será:

$$f\,(380 \text{ nm}) = 7{,}89 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1};\; f\,(780 \text{ nm}) = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{780 \cdot 10^{-9} \text{ nm}} = 3{,}85 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

3. En el proceso de fotosíntesis, la clorofila absorbe radiación de 670 nm. Determina:

***a)* La energía de un fotón de dicha radiación.**

***b)* La energía de un mol de estos fotones.**

a) $E_{fotón} = hf = h\dfrac{c}{\lambda};\; E_{fotón}\,(\lambda = 670 \text{ nm}) = \dfrac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{670 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3{,}0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

b) $E_{mol} = 6{,}022 \cdot 10^{23} \dfrac{\text{fotones}}{\text{mol}} \times 3{,}0 \cdot 10^{-19} \dfrac{\text{J}}{\text{fotón}} = 1{,}8 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$

4. Al incidir luz ultravioleta de $9{,}5 \cdot 10^{14}$ s^{-1} sobre una lámina metálica, se producen fotoelectrones que salen a una velocidad máxima igual a una milésima parte de la velocidad de la luz en el vacío. Calcula la frecuencia umbral del metal.

Suponiendo que la velocidad es la máxima de los electrones emitidos, será:

$v_{máx} = \dfrac{c}{10^3} = 3 \cdot 10^5$ m/s. Por tanto, $E_c(máx) = \dfrac{1}{2} m_e \cdot v^2$

$$E_c(máx) = \frac{1}{2} \times 9{,}11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \times (3 \cdot 10^5 \text{ m/s})^2 = 4{,}1 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

Como $E_c(máx) = h\,(f - f_o)$, de aquí: $f_o = f - \dfrac{E_c(máx)}{h}$

Sustituyendo valores:

$$f_o = 9{,}5 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1} - \frac{4{,}1 \cdot 10^{-20}\ \text{J}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}};\ f_o = 8{,}9 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$$

5. Si se *calienta* un átomo de hidrógeno, ¿qué le ocurre a su electrón? ¿Cómo se llama el nivel energético en el que se puede encontrar?

El verbo *calentar* significa, en este caso, recibir energía. Por tanto, el electrón, que inicialmente se encuentra en el estado fundamental, podrá acceder a niveles superiores de energía que se denominan estados excitados. En el caso límite, se puede llegar a la ionización; es decir, a la liberación del electrón del campo eléctrico creado por el núcleo.

6. Un electrón promociona de su nivel energético fundamental al segundo nivel energético excitado. ¿Absorberá o emitirá radiación? Calcula:

***a)* La frecuencia de la radiación.**

***b)* La zona del espectro en que se encontraría dicha radiación.**

Cuando un electrón pasa del nivel fundamental a un nivel excitado, necesita un aporte externo de energía. Si es en forma de radiación, el átomo debe absorberla.

a) La frecuencia de la radiación absorbida es $f = \frac{|\Delta E|}{h}$, donde $|\Delta E|$ es la diferencia de energía entre los niveles involucrados, E_1 y E_3.

b) La zona del espectro depende del átomo. En el caso del hidrógeno, corresponde al ultravioleta:

$$f = \frac{-2{,}18 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{1}{3^2} - \left(-2{,}18 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{1}{1^2}\right)}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}} = 2{,}92 \cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}$$

7. Calcula la longitud de onda asociada a:

***a)* Una pelota de 300 g de peso que se mueve a la velocidad de 210 km/h.**

***b)* Un electrón que se mueve a 17 000 km/h.**

a) $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{0{,}3\ \text{kg} \times 58{,}3\ \text{m/s}} = 3{,}8 \cdot 10^{-35}\ \text{m}$

b) $\lambda = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \times 4{,}7 \cdot 10^{3}\ \text{m/s}} = 3{,}8 \cdot 10^{-35}\ \text{m}$

8. Calcula la velocidad de un electrón cuya onda asociada tiene una longitud de 1 500 nm.

Despejando v en la ecuación de De Broglie:

$$v = \frac{h}{\lambda \cdot m} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1\,500 \cdot 10^{-9}\ \text{m} \times 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}} = 485\ \text{m/s}$$

1 ESTRUCTURA ATÓMICA DE LA MATERIA. TEORÍA CUÁNTICA

SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES DE FINAL DE UNIDAD

Radiación electromagnética. Hipótesis de Planck

1. Explica brevemente qué es una onda electromagnética y qué magnitudes la caracterizan.

Una onda electromagnética es una perturbación que se propaga en el espacio por medio de oscilaciones periódicas del campo electromagnético. No es, por tanto, una onda material. De hecho, el medio de propagación óptimo para las ondas electromagnéticas es el vacío.

Como sucede en todas las ondas, las magnitudes fundamentales son tres:

- Frecuencia, f.
- Longitud de onda, λ.
- Velocidad de propagación, v.

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas se propagan a la misma velocidad, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Dentro de un medio material, la velocidad de propagación depende de la frecuencia, y es, siempre, menor que c.

2. ¿Qué radiación se propaga con mayor velocidad en el vacío, los rayos X o las ondas de radio?

Tanto los rayos X como las ondas de radio son radiación electromagnética. En el vacío, se propagan con la misma velocidad, aunque la frecuencia de los rayos X es muy superior a la de las ondas de radio.

3. ¿Qué significa que la energía solo se puede absorber o emitir en valores discretos?

Significa que un cuerpo o sistema no puede aumentar o disminuir su energía en una cantidad arbitraria, sino solo en múltiplos enteros de una cantidad mínima llamada **cuanto de energía.** Si el cuerpo emite o absorbe luz, el cuanto de energía vale $h \cdot f$, donde h es la constante de Planck, y la f, la frecuencia de la luz.

4. A la vista de la figura inferior, ¿qué radiación es más energética, una luz azul o una luz naranja? ¿Por qué? Utilizando las fórmulas estudiadas en la unidad, calcula la energía que lleva asociada un fotón de cada una de estas radiaciones.

La luz azul es más energética que la luz naranja, porque la frecuencia de la luz azul es mayor, o, lo que es similar, su longitud de onda es más corta. Tomando para la luz azul $\lambda = 450$ nm y para la luz naranja $\lambda = 620$ nm, será:

$$E_{fotón} = h \cdot f = h\,\frac{c}{\lambda};\; E_{fotón}\,(azul) = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s} \times 3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{450 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} = 4{,}4 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

$$E_{fotón}\,(naranja) = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s} \times \frac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{620 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} = 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

5. El color azul que se puede observar en el cielo es debido a la dispersión de la luz solar por las partículas atmosféricas. Calcula la energía aproximada que lleva asociada un fotón de dicha radiación. Expresa el resultado en julios y en electronvoltios.

La luz azul es la fracción de la luz visible comprendida entre el verde y el índigo o añil. La longitud de onda que corresponde al centro de la región azul es $\lambda = 475$ nm:

$$E_{fotón}\,(azul) = h \cdot f = h\,\frac{c}{\lambda} = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s} \times \frac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{450 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} = 4{,}19 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Por tanto, en electronvoltios será:

$$E_{fotón}\,(azul) = 4{,}19 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \times \frac{1\ \text{eV}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} = 2{,}62\ \text{eV}$$

6. El ojo humano solo es sensible a la radiación electromagnética con frecuencias comprendidas entre $7{,}5 \cdot 10^{14}$ s^{-1} y $4{,}0 \cdot 10^{14}$ s^{-1}. ¿Cuál de ellas es más energética? ¿Por qué? Calcula la energía que lleva asociada 1 mol de fotones de cada una de las dos radiaciones.

Cuanto mayor sea la frecuencia, más energética es la radiación. Por tanto, los fotones de la luz con $f = 7{,}5 \cdot 10^{14}$ s^{-1} transportan más energía.

En cuanto a la energía asociada a un mol de fotones, será:

- $f = 7{,}5 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1};\ E\,(1\ \text{mol}) = 6{,}022 \cdot 10^{23}\,\frac{\text{fotones}}{\text{mol}} \times 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s} \times 7{,}5 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1};$

  $E = 3{,}0 \cdot 10^{5}\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$

- $f = 4{,}0 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1};\ E\,(1\ \text{mol}) = 6{,}022 \cdot 10^{23}\,\frac{\text{fotones}}{\text{mol}} \times 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s} \times 4{,}0 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1};$

  $E = 1{,}6 \cdot 10^{5}\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$

7. La capa de ozono absorbe radiaciones ultravioletas que llegan desde el espacio y que producen alteraciones genéticas. Utilizando los datos de la figura 10 de esta unidad, calcula la energía mínima que lleva asociada un fotón de esta radiación.

La radiación ultravioleta es la primera región del espectro electromagnético cuya frecuencia supera la del visible. Aproximadamente, el ultravioleta comienza cuando $\lambda = 400$ nm.

Por tanto, $E_{fotón}\,(400\ \text{nm}) = h\,\frac{c}{\lambda} = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s} \times \frac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{400 \cdot 10^{-9}\ \text{J}} = 5 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$

8. Las líneas de alta tensión emiten radiación electromagnética de frecuencia 60 s⁻¹. ¿En qué zona del espectro aparece? ¿Cuál es su longitud de onda, expresada en nanómetros? ¿Y la energía asociada a 1 mol de fotones de esta radiación? Compara el resultado con el obtenido en la actividad 6.

Si $f = 60\ s^{-1}$, será $\lambda = \dfrac{c}{f} = \dfrac{3 \cdot 10^8\ m/s}{60\ s^{-1}} = 5 \cdot 10^6\ m = 5 \cdot 10^{15}\ nm$.

Se trata de ondas radioeléctricas de enorme longitud de onda. Un mol de fotones de esta radiación transporta:

$$E\ (1\ mol) = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \frac{\text{fotones}}{\text{mol}} \times 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s \times 60\ s^{-1} = 2{,}4 \cdot 10^{-8}\ J \cdot mol^{-1}$$

Aproximadamente, transporta una energía 10^{13} veces menor que el visible.

9. La radiación solar que llega a la Tierra tiene una longitud de onda de máxima intensidad que vale λ = 480 nm. Calcula la temperatura de la fotosfera; es decir, de la capa solar responsable de la emisión de la luz.

Aplicamos la ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{máx} \cdot T = k;\ T = k/\lambda_{máx} = 2{,}9 \cdot 10^{-3}\ m \cdot K/480 \cdot 10^{-9}\ m;\ T = 6{,}0 \cdot 10^3\ K$$

Efecto fotoeléctrico y dualidad onda-corpúsculo

10. ¿Qué es el efecto fotoeléctrico? ¿Y la frecuencia umbral?

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de una superficie metálica al ser iluminada. La frecuencia umbral es la frecuencia mínima que ha de tener la luz utilizada para provocar efecto fotoeléctrico. Es característica de cada material fotoemisor.

11. A partir de la ecuación [4] del texto, obtén una expresión que relacione la velocidad con que sale un electrón de un metal cuando sobre él incide una radiación de frecuencia f. Supón que la frecuencia umbral es f_o, y la masa del electrón, m_e.

La energía cinética máxima que puede presentar un fotoelectrón es

$$E_c\ (máx) = h \cdot f - h \cdot f_o,\ \text{donde } f > f_o$$

En consecuencia, será:

$$\frac{1}{2}\ m_e \cdot v^2_{máx} = h \cdot f - h \cdot f_o;\ \text{de aquí, } v_{máx} = \sqrt{\frac{2h\ (f - f_o)}{m_e}}$$

12. Una lámpara emite radiación con una longitud de onda de 420 nm. Se hace incidir la luz producida sobre una lámina metálica cuya frecuencia umbral es $3{,}5 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$. ¿Se producirá emisión de electrones? Justifica la respuesta.

Puesto que $f = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{3 \cdot 10^8\ m/s}{420 \cdot 10^{-9}\ m} = 7{,}14 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$ es muy superior a la frecuencia umbral, sí se producirá efecto fotoeléctrico.

13. Un láser rojo de helio-neón (λ = 633 nm) tiene una potencia de 1 mW ¿Cuántos fotones son expulsados por la salida del láser en 50 s?

Como la potencia del láser es de 1 mW, la energía luminosa producida en 50 s es: $1 \cdot 10^{-3}$ W × 50 s = 0,05 J. Cada fotón lleva una energía de:

$$E_{fotón} = h \frac{c}{\lambda} = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} \frac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{633 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} = 3{,}14 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

El número de fotones expulsados es:

$$n = \frac{E}{E_{fotón}} = \frac{0{,}05\ \text{J}}{3{,}14 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} = 1{,}6 \cdot 10^{17}$$

14. Calcula la energía cinética máxima de los electrones emitidos al iluminar una superficie metálica de cinc con luz ultravioleta de longitud de onda igual a 320 nm.

Dato: frecuencia umbral del cinc = $8{,}3 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$.

Utilizando la expresión obtenida en el ejercicio 11, será:

$$v_{máx} = \sqrt{\frac{2h\,(f - f_o)}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} \times \left(\dfrac{3 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{320 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} - 8{,}3 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}\right)}{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} =$$

$= 3{,}96 \cdot 10^{5}$ m/s, donde hemos hecho $f = \dfrac{c}{\lambda}$ y hemos comprobado que $f > f_o$

15. La frecuencia de la radiación emitida por un horno microondas es de 2 450 MHz. ¿Será suficiente para arrancar electrones de una lámina metálica cuya energía umbral es $5{,}5 \cdot 10^{-19}$ J?

Los fotones de la radiación de microondas tienen una energía:

$$E_{fotón} = h \cdot f = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} \times 2\,450 \cdot 10^{6}\ \text{s}^{-1} = 1{,}62 \cdot 10^{-24}\ \text{J}$$

que es muy inferior a la energía umbral de la lámina metálica.

No se arrancan electrones.

16. ¿Qué significa que la luz tiene una naturaleza dual? ¿Se comporta simultáneamente como onda y como partícula?

La naturaleza dual de la luz es una forma de expresar que en ciertas experiencias la luz se comporta como lo haría una onda (difracción, interferencias), pero en otras, lo hace como si fuera una partícula o un corpúsculo (efecto fotoeléctrico).

Aunque la noble naturaleza está siempre presente en la luz, el comportamiento ondulatorio predomina cuando λ es grande, mientras que el comportamiento corpuscular predomina cuando f es grande.

17. Aplicando la ecuación [12], justifica por qué el electrón sí manifiesta propiedades ondulatorias y, sin embargo, una partícula mucho mayor, por ejemplo, de 10 kg de peso, no las manifiesta.

La ecuación de De Broglie acopla las dos naturalezas, tanto la de la luz como la de la materia:

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

En el caso de partículas materiales, $p = m \cdot v$. Por tanto, cuanto mayor es m, menor es λ. A causa del minúsculo valor de h, las longitudes de onda de De Broglie conducen a ondas indetectables, excepto si m es muy pequeño. Así, para una velocidad de 1 km/s, tendremos:

$$\lambda(\text{electrón}) = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \times 10^{3}\ \text{m/s}} = 7{,}3 \cdot 10^{-7}\ \text{m}$$

$$\lambda(m = 10\ \text{kg}) = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{10\ \text{kg} \times 10^{3}\ \text{m/s}} = 6{,}63 \cdot 10^{-38}\ \text{m}$$

La longitud de onda asociada al electrón es pequeña, pero detectable (los átomos, por ejemplo, son más pequeños). La longitud de onda asociada al cuerpo de 10 kg es indetectable.

18. Calcula la energía cinética de un electrón cuya longitud de onda asociada vale 0,1 Å.

La ecuación de De Broglie dice que: $\lambda = \dfrac{h}{m \cdot v}$

Por tanto, $m \cdot v = \dfrac{h}{\lambda} = \dfrac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{0{,}1 \cdot 10^{-10}\ \text{m}} = 6{,}63 \cdot 10^{-23}\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

De aquí,

$$E_c = \frac{1}{2}\, m \cdot v^2 = \frac{(m \cdot v)^2}{2\, m} = \frac{(6{,}63 \cdot 10^{-23}\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2 \times 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}} = 2{,}41 \cdot 10^{-15}\ \text{J}$$

Aunque parece poco, es mucha energía para un electrón, aproximadamente, 15 keV.

19. La difracción de neutrones es una técnica ampliamente utilizada para determinar la estructura interna de las moléculas. Esta técnica aprovecha el comportamiento ondulatorio de los neutrones. Sabiendo esto:

¿Qué velocidad han de llevar los neutrones empleados para que la longitud de la onda asociada, u onda de De Broglie, sea de 5 pm?

Despejamos la velocidad en la ecuación de De Broglie aplicada a la materia:

$$v = \frac{h}{\lambda \cdot m} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{5 \cdot 10^{-12}\ \text{m} \times 1{,}675 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}} = 7{,}92 \cdot 10^{4}\ \text{m/s}$$

donde hemos empleado la masa del neutrón, $m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ kg.

Espectros atómicos. Modelo de Bohr

20. Expón brevemente qué es un espectro, así como las diferencias que existen entre un espectro continuo y otro discontinuo.

Un espectro es un registro (gráfico, visual, etc.) de la descomposición de la luz absorbida o emitida por un cuerpo; es decir, es la yuxtaposición de todas las componentes de dicha luz.

En un espectro continuo no hay separación entre los diferentes componentes; la transición de unas a otras es suave, gradual. Por tanto, un espectro continuo contiene infinitas componentes. En un espectro discontinuo solo hay unas cuantas componentes claramente separadas entre sí. El paso de unas a otras es brusco, con regiones vacías entre ellas.

21. La figura muestra el espectro de una determinada sustancia. ¿Es un espectro continuo, o discontinuo? ¿Es de absorción, o de emisión? Justifica las respuestas.

Es un espectro discontinuo y de absorción. Se ven ausencias espaciadas sobre un fondo continuo.

22. Utilizando la ecuación [6], calcula la longitud de onda de la radiación debida al tránsito electrónico $n_2 = 3 \rightarrow n_1 = 2$ para el átomo de hidrógeno. Calcula, además, su frecuencia y la energía asociada a esta radiación.

La transición propuesta es la 1.ª línea de la serie de Balmer:

$$\frac{1}{\lambda} = 1{,}09678 \cdot 10^7\ \text{m}^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 1{,}5233 \cdot 10^6\ \text{m}^{-1};\ \lambda = 656\ \text{nm}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8\ \text{m/s}}{656 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} = 4{,}57 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$$

$$E_{fotón} = h \cdot f = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s} \times 4{,}57 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1} = 3{,}03 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

23. La serie Lyman recoge tránsitos cuya radiación aparece en el ultravioleta. Utilizando la ecuación [6] y la tabla 1, calcula la longitud de onda asociada a tres posibles tránsitos.

En la serie de Lyman, $n_1 = 1$. Tres posibles tránsitos son:

$$n_2 = 2;\ \lambda_{2\rightarrow1} = 122\ \text{nm};\ n_2 = 3;\ \lambda_{3\rightarrow1} = 103\ \text{nm};\ n_2 = 4;\ \lambda_{4\rightarrow1} = 97\ \text{nm}$$

24. Explica brevemente las analogías y las diferencias fundamentales entre los modelos atómicos de Rutherford y de Bohr.

Ambos son modelos atómicos con núcleo y con los electrones orbitando; pero en el modelo de Rutherford los electrones pueden ocupar cualquier órbita y su energía varía de forma continua. En el modelo de Bohr, la energía de los electrones está cuantizada y solo hay unas pocas órbitas permitidas.

25. Razona la veracidad o la falsedad de las siguientes afirmaciones referidas al modelo atómico de Bohr:

a) **Los electrones pueden encontrarse girando a cualquier distancia del núcleo.**

b) **El espectro de emisión del átomo de hidrógeno es discontinuo; esto es, está constituido por un conjunto limitado de líneas.**

c) **El electrón del átomo de hidrógeno solo puede ocupar determinadas órbitas, las cuales están cada vez más alejadas entre sí.**

a) Falso. Solo se permiten unas pocas órbitas.

b) Cierto. Cada línea corresponde a un salto entre estados permitidos.

c) Cierto. El radio de las órbitas permitidas crece según n^2.

26. Explica brevemente el signo negativo de la ecuación [10].

El signo negativo indica que los estados ligados del electrón tienen energía menor que el estado libre ($E = 0$). Se parece a la profundidad de un pozo: el fondo del pozo corresponde al estado fundamental.

27. Calcula la energía necesaria para promocionar el electrón del átomo de hidrógeno desde su estado fundamental al primer estado excitado.

Esta energía coincide con la de los fotones de la primera línea de la serie de Lyman. Con la ecuación [10] tendremos:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -\frac{k}{2^2} - \left(-\frac{k}{1^2}\right) = k \cdot \frac{3}{4} = 2{,}18 \cdot 10^{-18}\ \text{J} \cdot \frac{3}{4} = 1{,}64 \cdot 10^{-18}\ \text{J}$$

28. Suponiendo que el electrón del átomo de hidrógeno se encuentra en su estado fundamental, calcula, a partir de la ecuación [10], la energía necesaria para ionizar el átomo de hidrógeno.

La energía para ionizar el átomo de hidrógeno coincide con la energía, cambiada de signo, del estado fundamental:

$$E_i = -E_1 = -\left(2{,}18 \cdot 10^{-18}\ \text{J} \times \frac{1}{1^2}\right) = 2{,}18 \cdot 10^{-18}\ \text{J}$$

29. A partir de las ecuaciones [7] y [8] del texto, obtén la velocidad y la energía de un electrón para las órbitas permitidas de Bohr.

Dato: la energía total es la suma de la energía cinética y de la energía potencial eléctrica.

Combinamos $\frac{m \cdot v^2}{r} = K\frac{e^2}{r^2}$ y $m \cdot v \cdot r = n\frac{h}{2\pi}$ para obtener v:

$$v = K\frac{e^2}{r^2} \times \frac{r}{m \cdot v} = K\frac{e^2}{r^2} \times \frac{r}{n\frac{h}{2\pi}}\ ;\ v = \frac{2\pi \cdot K \cdot e^2}{h} \cdot \frac{1}{n}$$

Por otra parte, $E = E_c + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - m \cdot v^2 = -\frac{m \cdot v^2}{2}$

Sustituyendo el valor de v, queda: $E = -\frac{2\pi^2 \cdot K^2 \cdot e^4 \cdot m}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$

Mecánica cuántica y modelos atómicos

30. Expón brevemente qué es válido y qué no lo es del modelo de Bohr, según la mecánica cuántica.

Del modelo de Bohr son válidos los conceptos de **estado estacionario** y de **transición electrónica.** No es correcta la descripción del movimiento del electrón en órbitas.

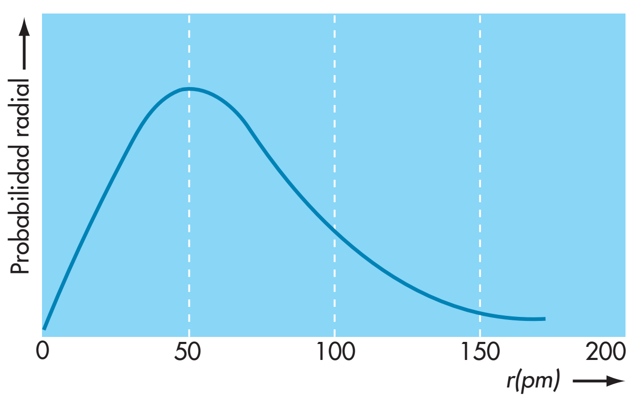
31. **¿Qué es la función de onda? ¿Por qué se introduce esta función en el estudio del electrón?**

La función de onda aparece en la ecuación de Schrödinger y recoge los aspectos dinámicos del movimiento de las partículas cuánticas. Esta función contiene toda la información dinámica que puede conocerse para un electrón.

32. **¿Qué es un orbital atómico? ¿Es lo mismo un orbital atómico que una órbita?**

Un orbital atómico es, matemáticamente, la función de onda de un estado permitido para un electrón atómico. Visualmente, es la región espacial donde se distribuye la probabilidad de encontrar el electrón. Un orbital no es lo mismo que una órbita. En un orbital se desconocen los detalles concretos (posición, velocidad) del movimiento del electrón.

33. **La figura inferior muestra, para cierto estado permitido, la probabilidad de encontrar al electrón en el átomo de hidrógeno en función de su distancia al núcleo.**



a) **¿A qué distancia será más probable encontrarlo?** ***b)*** **¿Dónde será mínima la probabilidad de encontrarlo?**

a) El punto de máxima probabilidad es la parte superior de la curva. En este caso, corresponde a un radio de 50 pm. *b)* La probabilidad es mínima para $r = 0$; es decir, en el núcleo, donde la probabilidad de encontrar al electrón es nula.

34. **¿Qué significado tiene el principio de incertidumbre de Heisenberg? Explica qué representa cada uno de los términos que aparece en la ecuación de Heisenberg.**

El principio de incertidumbre es una restricción al grado de conocimiento que podemos alcanzar para la posición y la cantidad de movimiento de una partícula cuántica cuando ambas se miden simultáneamente. Δx es la indeterminación en la medida de la posición (según el eje X); Δp es la indeterminación en la medida de la cantidad de movimiento; h es la constante de Planck.

35. ¿Por qué es imposible asumir, para la mecánica cuántica, el concepto de órbita de Bohr?

El concepto de órbita de Bohr es incompatible con el principio de Heisenberg: en una órbita sí se conocen la posición y la cantidad de movimiento en cualquier momento.

36. En el sistema atómico se determina la posición de un electrón con una precisión de 5 pm. ¿Cuál será la máxima precisión con la que podemos conocer simultáneamente la velocidad de dicho electrón, suponiendo que su masa se conoce con un error despreciable?

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \text{ ; } \Delta p \geq \frac{h}{\Delta x \cdot 4\pi} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{5{,}10^{-12} \text{ m} \cdot 4\pi} = 1{,}1 \cdot 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pero, como $\Delta m = 0$, $\Delta p = m \cdot \Delta v$; así que: $\Delta v = \dfrac{\Delta p}{m}$

$$\Delta v \geq \frac{1{,}1 \cdot 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{9{,}11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 1{,}2 \cdot 10^{7} \text{ m/s}$$

La indeterminación de v es tan grande que no sabemos cuál es la velocidad del electrón.

37. Si conocemos la velocidad de un neutrón con una indeterminación de 10 m/s, ¿cuál es la máxima precisión que podemos obtener para su posición? (Supón que la masa del neutrón se conoce con un error despreciable).

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \text{ ; } \Delta p = \Delta\,(m \cdot v) = m \cdot \Delta v = 1{,}675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}$$

$$\Delta p = 1{,}675 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ; } \Delta x \geq \frac{h}{\Delta p} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{1{,}675 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\Delta x \geq 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$