

## Actividades

1. ¿Qué fases del método científico desarrollaron fundamentalmente Faraday y Maxwell? ¿Qué es más importante para el progreso de la Física, el trabajo experimental o el análisis teórico de los hechos?

Faraday fue un genio en la experimentación; Maxwell lo fue en la elaboración de leyes y teorías científicas. Tanto el trabajo experimental como el análisis teórico de los hechos son imprescindibles para el progreso de la Física.

2. Explica con tus propias palabras qué entiendes por interacción electromagnética. ¿Qué es la síntesis electromagnética? ¿Qué materias unifica mediante una sola teoría?

Solo existen cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza: nuclear fuerte, electromagnética, nuclear débil y gravitatoria.

La interacción electromagnética unifica las fuerzas eléctricas y magnéticas. Es la responsable de que las moléculas, los átomos, la materia en general, permanezcan unidos.

Maxwell completó la unificación del electromagnetismo con la óptica, al predecir la existencia de ondas electromagnéticas, en lo que se denomina síntesis electromagnética, que unifica en una sola teoría la electricidad, el magnetismo y la óptica.

3. A partir de los valores de la constante dieléctrica del vacío  $\epsilon_0$  y de la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$ , comprueba que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es  $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ .

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2};$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ C}^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

4. Describe la naturaleza de las ondas electromagnéticas y representa esquemáticamente su propagación incluyendo los vectores del campo eléctrico y magnético.

Las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y otro magnético, variables, que oscilan en planos perpendiculares entre sí y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Son ondas transversales (ver Figura 9.1 del libro de texto).

5. Calcula la frecuencia y el periodo de una onda electromagnética de 2,5 cm de longitud de onda. ¿Qué tipo de onda es?

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}} = 8,3 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

Se trata de una onda de radio corta.

6. ¿Por qué los rayos infrarrojos y los ultravioleta reciben este nombre? ¿Cómo son sus longitudes de onda y sus frecuencias comparadas con las de la luz visible?

Los rayos infrarrojos tienen frecuencias inferiores a la luz roja y los ultravioleta tienen frecuencias mayores que la luz violeta.

Con sus longitudes de onda ocurre lo contrario: los rayos infrarrojos tienen longitudes de onda mayores que la luz roja; la luz ultravioleta tiene longitudes de onda menores que la luz violeta.

7. Calcula la energía de los siguientes fotones:

Un fotón de luz verde de longitud de onda igual a 520 nm.

Un fotón de luz amarilla de longitud de onda igual a 581 nm.

$$a) E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{520 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,83 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$b) E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{581 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

8. ¿Qué fenómenos ópticos constituyen una prueba a favor de la teoría corpuscular de la luz y cuáles son favorables a la teoría ondulatoria?

La teoría corpuscular de la luz es la única capaz de explicar el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

Los fenómenos ópticos favorables a la teoría ondulatoria de la luz son los característicos de todas las ondas: reflexión, refracción, difracción, interferencias, etc.

9. ¿Qué fotón es más energético, el de la luz roja o el de la luz azul?

Es más energético el fotón de luz azul, porque las frecuencias de este tipo de luz son mayores que las frecuencias de la luz roja:  $E = hf$ .

10. La longitud de onda central de la radiación emitida por el Sol y las estrellas Sirio y Betelgeuse es 500 nm, 300 nm y 900 nm, respectivamente. Calcula, para cada estrella, la energía de un fotón correspondiente a la luz central emitida.

$$\text{Para el Sol: } E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{500 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,98 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Para Sirio: } E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{300 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Para Betelgeuse: } E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{900 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 2,21 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

11. La estrella Alfa (Próxima Centauri) de la constelación Centauro es la estrella más cercana a la Tierra. Se encuentra a 4,3 años luz. ¿A qué distancia se sitúa en kilómetros?

$$s = ct = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} \cdot (4,3 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} = 4,1 \cdot 10^{16} \text{ m} = 4,1 \cdot 10^{13} \text{ km}$$

12. La distancia aproximada entre el Sol y la Tierra es de 150 millones de kilómetros. ¿Cuánto tiempo tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra?

$$t = \frac{s}{c} = \frac{1,5 \cdot 10^8 \text{ km}}{3 \cdot 10^5 \text{ km s}^{-1}} = 500 \text{ s}$$



13. **¿Cuánto vale la velocidad de propagación de un rayo de luz monocromática en el agua? Dato: índice de refracción del agua  $n = 4/3$**

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4/3} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

14. **El espectro visible contiene frecuencias entre  $4 \cdot 10^{14}$  Hz y  $7 \cdot 10^{14}$  Hz. Cuando la luz se propaga por el agua:**

a) **¿Se modifican estos valores de las frecuencias y de las longitudes de onda?**

b) **En caso afirmativo, calcula los valores correspondientes.**

Datos:  $n_a = 1,3$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ .

a) Cuando la luz se propaga en el agua, varía su velocidad y esto queda reflejado en el valor del índice de refracción en ese medio. Sin embargo, la frecuencia es un valor fijo que nunca cambia, de modo que el cambio de velocidad solo afecta a la longitud de onda.

b) Las longitudes de onda en el vacío y en el aire son:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m};$$

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{7 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Las longitudes de onda en el agua son:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,3} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{7 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ m};$$

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{2,3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{7 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

15. **El índice de refracción absoluto del diamante es 2,38 para una luz cuya longitud de onda es de 6200 Å en el aire.**

Calcula:

a) **La velocidad de esa luz en el diamante.**

b) **Su longitud de onda y su frecuencia en el interior del diamante.**

$$a) v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,38} = 1,26 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$b) \lambda = \frac{\lambda_0}{n_0} = \frac{6,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{2,38} = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 260 \text{ nm}$$

La frecuencia en el interior del diamante es la misma que en el aire:

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

16. **¿Por qué los índices de refracción absoluto y relativo no tienen unidades?**

El índice de refracción absoluto es el cociente entre dos velocidades. El índice de refracción relativo es el cociente entre dos índices de refracción absolutos.

17. **Un haz de luz monocromática incide sobre la superficie de un vidrio ( $n = 1,54$ ) con un ángulo de  $30^\circ$ . ¿Cuánto valen los ángulos de reflexión y refracción?**

El ángulo de reflexión es igual que el ángulo de incidencia:

$$r = i = 30^\circ$$

El ángulo de refracción se obtiene a partir de la Ley de Snell de la refracción:

$$\text{sen } r = \frac{n_1 \text{ sen } i}{n_2} = \frac{1 \cdot \text{sen } 30^\circ}{1,54} = 0,325; \quad r = 19^\circ$$

18. **Quando un rayo de luz pasa desde el benceno ( $n = 1,50$ ) al agua ( $n = 1,33$ ), ¿a partir de qué ángulo se produce la reflexión total?**

La reflexión total se produce para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite:

$$\text{sen } \ell = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1,50} = 0,887; \quad \ell = 62,5^\circ$$

19. **Considérese un haz de luz monocromática, cuya longitud de onda en el vacío es  $\lambda = 600 \text{ nm}$ . Este haz incide, desde el aire, sobre la pared de vidrio de un acuario con ángulo de incidencia de  $30^\circ$ . Determina:**

a) **El ángulo de refracción en el vidrio, sabiendo que su índice de refracción es  $n_1 = 1,50$ .**

b) **La longitud de onda de dicho haz en el agua, sabiendo que su índice de refracción es  $n_2 = 1,33$ .**

Datos: índice de refracción del aire  $n = 1,00$

a)  $n \cdot \text{sen } i = n_1 \text{ sen } r$ ;  $1,00 \cdot \text{sen } 30^\circ = 1,50 \cdot \text{sen } r$ ;  $r = 19,5^\circ$

b) La frecuencia de una onda no cambia al pasar de un medio a otro:

$$(\lambda n)_{\text{agua}} = (\lambda n)_{\text{aire}}; \lambda_{\text{agua}} = \frac{(\lambda n)_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 1,00}{1,33} = 451 \text{ nm}$$

20. **Un rayo de luz se propaga desde el aire al agua, de manera que el rayo incidente forma un ángulo de  $30^\circ$  con la normal a la superficie de separación aire-agua, y el rayo refractado forma un ángulo de  $128^\circ$  con el rayo reflejado.**

a) **Determina la velocidad de propagación de la luz en el agua.**

b) **Si el rayo luminoso invierte el recorrido y se propaga desde el agua al aire, ¿a partir de qué ángulo de incidencia se produce la reflexión total?**

a) El ángulo de reflexión será de  $30^\circ$  y el de refracción:

$$180 - (30 + 128) = 22$$

$$1 \cdot \text{sen } 30^\circ = n_{\text{agua}} \cdot \text{sen } 22^\circ; n_{\text{agua}} = 1,33$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,33} = 2,26 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

b)  $n_{\text{agua}} \cdot \text{sen } \ell = n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } 90^\circ$ ;  $\text{sen } \ell = \frac{1,00 \cdot 1}{1,33} = 0,752$ ;

$$\ell = 48,8^\circ$$

21. Sobre una lámina de vidrio de caras planas y paralelas, de espesor 4,1 cm y de índice de refracción  $n = 1,50$ , situada en el aire, incide un rayo de luz monocromática con un ángulo de  $20^\circ$ . Calcula la distancia recorrida por el rayo en el interior de la lámina y el desplazamiento lateral del rayo emergente.

El ángulo de refracción en la primera cara de la lámina ( $r_1$ ) es igual al ángulo de incidencia en la segunda cara. Su valor es:

$$n_1 \operatorname{sen} i = n_2 \operatorname{sen} r_1$$

$$\operatorname{sen} r_1 = \frac{n_1 \operatorname{sen} i}{n_2} = \frac{1 \cdot \operatorname{sen} 20^\circ}{1,50} = 0,228; \quad r_1 = 13,2^\circ$$

El desplazamiento lateral es:

$$\delta = s \frac{\operatorname{sen}(i_1 - r_1)}{\cos r_1} = 4,1 \text{ cm} \cdot \frac{\operatorname{sen}(20^\circ - 13,2^\circ)}{\cos 13,2^\circ} = 0,50 \text{ cm}$$

La distancia recorrida por la luz en el interior de la lámina ( $x$ ) es la siguiente:

$$x = \frac{s}{\cos r_1} = \frac{4,1 \text{ cm}}{\cos 13,2^\circ} = 4,2 \text{ cm}$$

22. Sobre un prisma de vidrio de ángulo  $40^\circ$  e índice de refracción 1,51, situado en el aire, incide un rayo de luz monocromática con un ángulo de  $45^\circ$ . Calcula:

a) El ángulo de emergencia del rayo de luz.

b) El ángulo de desviación sufrido por el rayo.

a) Al aplicar la Ley de Snell de la refracción en la primera cara del prisma se obtiene:

$$\operatorname{sen} r = \frac{\operatorname{sen} i}{n} = \frac{\operatorname{sen} 45^\circ}{1,51} = 0,468; \quad r = 27,9^\circ$$

Como el ángulo del prisma es de  $40^\circ$ , se cumple:

$$r' = \varphi - r = 40^\circ - 27,9^\circ = 12,1^\circ$$

La Ley de Snell de la refracción aplicada a la segunda cara del prisma permite obtener el ángulo de emergencia  $i'$ :

$$1 \cdot \operatorname{sen} i' = n \operatorname{sen} r'$$

$$\operatorname{sen} i' = 1,51 \cdot \operatorname{sen} 12,1^\circ = 0,317; \quad i' = 18,5^\circ$$

b) Como  $d = i + i' - \varphi$ , resulta:

$$\delta = 45^\circ + 18,5^\circ - 40 = 23,5^\circ$$

23. ¿Se propagan todas las luces con la misma velocidad en el vidrio? ¿Depende su velocidad de la longitud de onda? ¿Ocurre lo mismo en cualquier medio material transparente?

En el vidrio, como en cualquier otro medio material transparente, las distintas luces no se propagan con la misma velocidad, solo lo hacen en el vacío.

La velocidad de propagación depende del índice de refracción y, por tanto, de la longitud de onda de la luz.

24. El índice de refracción de un prisma óptico, ¿es igual para la luz roja que para la luz verde? Relaciona la respuesta con la dispersión de la luz en un prisma óptico.

Las luces de distintos colores se propagan en los medios materiales con velocidades diferentes, sólo en el vacío se propagan

con la misma velocidad. La ley de Snell de la refracción se puede escribir así:

$$\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Como la luz roja tiene mayor longitud de onda que la luz verde, para ella el índice de refracción es menor, se refracta menos, y el ángulo de refracción es ligeramente mayor que para la luz verde. Este hecho da lugar a la dispersión de la luz blanca en un prisma óptico.

25. Una superficie verde, iluminada con luz blanca, ¿qué color tiene? ¿Y si se ilumina con luz verde? ¿Qué color tiene si la iluminamos con luz azul?

Una superficie verde, iluminada con luz blanca, tiene color verde. Si se ilumina con luz verde, también tiene color verde. En cambio, si se ilumina con luz azul, tiene color negro.

26. Explica las diferencias entre la mezcla aditiva y la mezcla sustractiva de colores.

La obtención de distintos colores por mezcla de luces de colores se denomina mezcla aditiva. A partir de luces de color rojo, verde y azul (colores primarios) se reproduce luz blanca y una gran gama de colores.

Cuando se mezclan pinturas siempre se resta luz, por lo que se denomina mezcla sustractiva. Al mezclar pintura roja, verde y azul no se obtiene color blanco; al contrario, se obtiene color negro. En este caso los colores primarios son el amarillo, el cian y el magenta.

27. Determina el coeficiente de absorción de un material transparente de 3,4 cm de espesor, para que al ser atravesado por una onda luminosa la intensidad disminuya en un 5,2 %.

Según la Ley general de absorción de una onda, se cumple:  $I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$  siendo  $\alpha$  el coeficiente de absorción y  $x$  el espesor atravesado.

$$0,948 I_0 = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}; \quad 0,948 = e^{-\alpha \cdot x}; \quad L \quad 0,948 = -\alpha \cdot 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}; \quad \alpha = 1,6 \text{ m}^{-1}$$

28. Un haz de luz monocromática que se propaga por el aire incide sobre una superficie de agua. Determina el ángulo de incidencia (ángulo de Brewster) para el que el rayo reflejado sea perpendicular al refractado.

Datos: índice de refracción del agua = 1,33.

Como el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, el ángulo que forma el rayo reflejado con la superficie del agua vale  $90^\circ - i$ .

El ángulo que forma el rayo refractado con la superficie del agua vale  $90^\circ - r$ .

De acuerdo con el enunciado, la suma de ambos ángulos es igual a  $90^\circ$ :

$$90^\circ - i + 90^\circ - r = 90^\circ; \quad 180^\circ - i - r = 90^\circ; \quad r = 90^\circ - i$$

A partir de la Ley de Snell de la refracción se obtiene el ángulo de incidencia:

$$n \operatorname{sen} i = n_a \operatorname{sen} r; \quad 1 \cdot \operatorname{sen} i = 1,33 \operatorname{sen}(90^\circ - i);$$

$$\operatorname{sen} i = 1,33 \cos i; \quad \operatorname{tg} i = 1,33;$$

$$i = 53^\circ$$



## Ciencia, tecnología y sociedad

1. Una fibra óptica está fabricada con dos materiales de índices de refracción 1,58 y 1,42, respectivamente. ¿Cuál corresponde al material situado en el interior de la fibra?

- a) 1,58  
b) 1,42  
c) 1,58 + 1,42 = 3

a) El índice de refracción en el interior de la fibra debe ser el mayor: 1,58

2. El índice de refracción del núcleo central de una fibra óptica vale 1,62, y el de la superficie de la fibra es 1,48. ¿A partir de qué ángulo de incidencia se produce la reflexión interna total?

- a) 58°  
b) 66°  
c) 45°

b)  $\sin \ell = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,48}{1,62} = 0,913$  ;  $\ell = 66^\circ$

3. Un rayo de luz de longitud de onda en el vacío  $\lambda_0 = 650$  nm incide desde el aire sobre el extremo de una fibra óptica formando un ángulo  $u$  con el eje de la fibra, siendo el índice de refracción  $n_1$  dentro de la fibra 1,48.

- a) ¿Cuál es la longitud de onda de la luz dentro de la fibra?  
b) La fibra está revestida de un material de índice de refracción  $n_2 = 1,44$ . ¿Cuál es el valor máximo del ángulo  $u$  para que se produzca la reflexión total interna?

a) La frecuencia de la onda no cambia al pasar de un medio a otro, pero sí su longitud de onda:  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n_1} = \frac{650 \text{ nm}}{1,48} = 439 \text{ nm}$

b) El ángulo límite en el interior de la fibra es:  $1,48 \cdot \sin \ell = 1,44 \cdot \sin 90^\circ$  ;  $\ell = 76,6^\circ$

Por tanto, el rayo debe formar con el eje de la fibra un ángulo menor de:  $r = 90^\circ - 76,6^\circ = 13,4^\circ$

El ángulo de incidencia desde el exterior es:  $1 \cdot \sin \theta = 1,48 \cdot \sin 13,4^\circ$  ;  $\theta = 20,0^\circ$

## Problemas propuestos

1. Calcula el periodo y la frecuencia de una onda electromagnética de 2,5 cm de longitud de onda. ¿Qué tipo de onda es?

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{2,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 8,3 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{8,3 \cdot 10^{-11} \text{ s}} = 12 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

Se trata de una onda de radio.

2. Las longitudes de onda de emisión de una cierta cadena de emisoras radiofónicas están comprendidas entre 50 y 200 m.

a) ¿Cuál es la banda de frecuencias de emisión de la cadena?

b) ¿Qué emisiones se propagan a mayor velocidad, las de frecuencia más alta o las de más baja?

$$a) f = \frac{c}{\lambda}; \quad f_1 = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{50 \text{ m}} = 6,0 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$f_2 = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{200 \text{ m}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$$

Por tanto, la banda de frecuencias utilizada va desde  $1,5 \cdot 10^6$  Hz hasta  $6 \cdot 10^6$  Hz.

b) Se propagan a la misma velocidad.

3. Escribe las ecuaciones que representan el campo eléctrico y el campo magnético de una onda electromagnética plana que se propaga en el sentido positivo del eje  $Ox$ . La amplitud del campo eléctrico es de 8 N/C y la frecuencia de 1 MHz.

$$E_0 = 8 \text{ N/C}; \quad f = 10^6 \text{ Hz}; \quad T = 10^{-6} \text{ s};$$

$$\lambda = cT = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^{-6} \text{ s} = 3 \cdot 10^2 \text{ m}$$

Al introducir estos valores en las ecuaciones de onda del campo eléctrico y del magnético, se obtiene:

$$E = 8 \sin 2\pi \left( \frac{t}{10^{-6}} - \frac{x}{3 \cdot 10^2} \right) \text{ N/C}$$

$$B = \frac{E}{c} = 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{10^{-6}} - \frac{x}{3 \cdot 10^2} \right)$$

4. Una de las frecuencias utilizadas en telefonía móvil (sistema GSM) es 900 MHz. ¿Cuántos fotones GSM necesitamos para obtener la misma energía que con un solo fotón de luz violeta de frecuencia  $7,5 \cdot 10^8$  MHz?

$$E_v = hf_v = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 7,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

La energía de un fotón GSM es:

$$E = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 900 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} = 5,97 \cdot 10^{-25} \text{ J}$$

El número de fotones GSM es:

$$n = \frac{E_v}{E} = \frac{4,97 \cdot 10^{-19}}{5,97 \cdot 10^{-25}} = 8,32 \cdot 10^5 \text{ fotones}$$

5. ¿Por qué decimos que la luz se comporta como si tuviera una doble naturaleza? ¿Este carácter dual se manifiesta simultáneamente en algún fenómeno concreto?

Porque en unos fenómenos se comporta como si tuviera naturaleza ondulatoria y en otros como si fuera corpuscular. Pero nunca manifiesta este carácter dual en un mismo fenómeno. Se puede comportar bien como onda, o bien como partícula.

6. Una onda luminosa que se propaga en el vacío tiene una longitud de onda de 580 nanómetros.

a) ¿Cuáles son su periodo y su frecuencia?

b) ¿De qué color es?

$$a) T = \frac{\lambda}{c} = \frac{5,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1,93 \cdot 10^{-15} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,93 \cdot 10^{-15} \text{ s}} = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

b) Es una luz amarilla.

7. La estrella Altair de la constelación de Águila está situada aproximadamente a 16 años luz de la Tierra. ¿A qué distancia en kilómetros se encuentra?

$$x = ct = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} \cdot (365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ km}$$

8. Una lámina de vidrio de 0,5 cm de espesor tiene un índice de refracción de 1,48 para un determinado rayo de luz. ¿Cuánto tiempo tarda este rayo en atravesarla perpendicularmente?

La velocidad de la luz en este vidrio es:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,48} = 2,03 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2,03 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}} = 2,46 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

9. El índice de refracción absoluto del hielo a 0 °C es 1,31 para una luz cuya longitud de onda es 589 nm en el aire.

a) ¿Cuál es la velocidad de esta luz en el hielo?

b) ¿Cuál es su longitud de onda cuando atraviesa el hielo?

$$a) v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,31} = 2,29 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$b) \lambda_h = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1,31} = 450 \text{ nm} = 45 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

10. Un rayo de luz de 625 nm de longitud de onda en el aire penetra en el agua ( $n = 1,33$ ).

a) ¿Cuál es su velocidad en el agua?

b) ¿Cuál es su frecuencia y su longitud de onda en este medio?

$$a) v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,33} = 2,26 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

b) Su frecuencia es la misma que en el aire:

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

La longitud de onda cambia:

$$\lambda_a = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{625 \text{ nm}}{1,33} = 470 \text{ nm} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

9. Los índices de refracción absolutos del diamante y del rubí, para una determinada luz monocromática, son 2,41 y 1,76, respectivamente. Calcula el índice de refracción relativo del diamante respecto al rubí y del rubí respecto al diamante.

$$n_{d,r} = \frac{n_d}{n_r} = \frac{2,41}{1,76} = 1,37; \quad n_{r,d} = \frac{n_r}{n_d} = \frac{1,76}{2,41} = 0,730$$

12. Un rayo de luz monocromática pasa del agua ( $n = 1,33$ ) al aire. Si el ángulo de incidencia es de 30,0°, calcula:

a) El valor del ángulo de refracción.

b) El ángulo límite. ¿A partir de qué ángulo no se produce refracción?

$$a) \text{ sen } r = \frac{n_1 \text{ sen } i}{n_2} = \frac{1,33 \text{ sen } 30^\circ}{1} = 0,665; \quad r = 41,7^\circ$$

$$b) \text{ sen } \ell = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1,33} = 0,752; \quad \ell = 48,8^\circ$$

Para ángulos de incidencia mayores que 48,8° no se produce refracción, la reflexión es total.

13. Un haz de luz roja de 695 nm de longitud de onda en el aire penetra en el agua ( $n = 1,33$ ). Si el ángulo de incidencia es de 35°, ¿cuál es el ángulo de refracción? ¿Cuál es la longitud de onda y la frecuencia del haz de luz en el agua?

El ángulo de refracción se obtiene a partir de la invariante de refracción:

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$$

$$\text{sen } r = \frac{n_1 \text{ sen } i}{n_2} = \frac{1 \cdot \text{sen } 35^\circ}{1,33} = 0,431; \quad r = 25,5^\circ$$

La frecuencia de la luz en el agua es la misma que en el aire:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,95 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,3 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

La longitud de onda en el agua es:

$$\lambda_a = \frac{\lambda_0}{n_a} = \frac{6,95 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{1,33} = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

14. ¿Cuál es el ángulo límite para la luz que pasa del benceno ( $n = 1,50$ ) al agua ( $n = 1,33$ )? ¿Y si la luz pasa del agua al benceno?

$$\text{sen } \ell = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1,50} = 0,887; \quad \ell = 62,5^\circ$$

Si la luz pasa del agua al benceno ( $n_1 < n_2$ ) no se produce el fenómeno de reflexión total, por lo que no existe un ángulo límite.

15. Sobre la superficie de un bloque de vidrio, cuyo índice de refracción es 1,50, se deposita una lámina de agua cuyo índice de refracción es 1,33. Calcula el ángulo crítico para la reflexión interna total de la luz que, propagándose por el vidrio, incidiese sobre la superficie de separación vidrio-agua.

$$1,50 \cdot \text{sen } \ell = 1,33 \cdot \text{sen } 90^\circ; \quad \ell = 62,5$$

16. Un rayo de luz viaja por un medio cuyo índice de refracción es  $n_1$  y pasa a otro cuyo índice de refracción es  $n_2$ .

Explica razonadamente las condiciones que deben cumplir los índices de refracción y el ángulo de incidencia para que se produzca la reflexión total del rayo incidente.

Calcula el ángulo de incidencia crítica a partir del cual se produce una reflexión total del rayo incidente, para los siguientes datos:  $n_1 = 1,5$  y  $n_2 = 1,2$ .

Este fenómeno sólo se produce cuando la luz pasa de un medio más refringente a otro menos refringente:  $n_1 > n_2$ . La reflexión total solo se produce para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite:  $\text{sen } \ell = n_2/n_1$

$$\text{sen } \ell = n_2/n_1 = 1,2/1,5 = 0,8; \quad \ell = 53$$





**17. Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque con un ángulo de incidencia de  $20^\circ$ . ¿Qué ángulo formarán entre sí los rayos reflejado y refractado? ¿Variando el ángulo de incidencia podría producirse el fenómeno de reflexión total? Razona la respuesta. Datos:  $n_{\text{aire}} = 1$ ,  $n_{\text{agua}} = 1,34$ .**

El ángulo de reflexión es también de  $20^\circ$  y el ángulo de refracción es:

$$1,00 \cdot \sin 20^\circ = 1,34 \cdot \sin r; \quad r = 14,8^\circ$$

El ángulo formado por los rayos reflejado y refractado es:  $180^\circ - (20^\circ + 14,8^\circ) = 145,2^\circ$

No se puede producir la reflexión total porque el rayo de luz pasa de un medio menos refringente (aire) a otro de índice de refracción mayor (agua).

**18. Un rayo de luz incide sobre una lámina de caras planas y paralelas con un ángulo de  $35^\circ$ . ¿Con qué ángulo emerge de la lámina? ¿Experimenta algún cambio en su propagación por el interior de la lámina?**

El ángulo de emergencia es igual al de incidencia:  $35^\circ$ .

El rayo de luz se refracta en ambas caras de la lámina y sufre un desplazamiento lateral.

**19. Sobre una lámina de vidrio de caras plano-paralelas de  $1,5 \text{ cm}$  de espesor y de índice de refracción  $1,58$  situada en el aire, incide un rayo de luz monocromática con un ángulo de  $30^\circ$ .**

- a) Dibuja la marcha geométrica del rayo.
- b) Comprueba que el ángulo de incidencia es igual que el ángulo de emergencia.
- c) Determina la distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina y el desplazamiento lateral del rayo emergente.

a) Véase libro de texto, Apartado 8.1.

b) Véase libro de texto, Apartado 8.1.

c) El ángulo de reflexión ( $r_1$ ) en la primera cara de la lámina se calcula al aplicar la Ley de Snell de la refracción:

$$\sin r_1 = \frac{n_1 \sin i_1}{n_2} = \frac{1 \cdot \sin 30^\circ}{1,58} = 0,316; \quad r_1 = 18,4^\circ$$

El desplazamiento lateral es el siguiente:

$$\delta = s \frac{\sin (i_1 - r_1)}{\cos r_1} = 1,5 \text{ cm} \cdot \frac{\sin (30^\circ - 18,4^\circ)}{\cos 18,4^\circ} = 0,32 \text{ cm}$$

La distancia recorrida por el rayo dentro de la lámina es:

$$x = \frac{s}{\cos r_1} = \frac{1,5 \text{ cm}}{\cos 18,4^\circ} = 1,6 \text{ cm}$$

**20. Sobre un prisma de vidrio de ángulo  $40^\circ$  e índice de refracción  $1,50$  incide un rayo de luz monocromática. Si el ángulo de incidencia es de  $45^\circ$ , calcula el ángulo de emergencia y la desviación producida en el rayo.**

El ángulo de refracción en la primera cara del prisma se obtiene a partir de la Ley de Snell:

$$\sin r = \frac{\sin i}{n} = \frac{\sin 45^\circ}{1,50} = 0,471; \quad r = 28,1^\circ$$

Como el ángulo del prisma es de  $40^\circ$ , se cumple:

$$r' = \varphi - r = 40^\circ - 28,1^\circ = 11,9^\circ$$

Al aplicar la Ley de Snell de la refracción a la segunda cara del prisma se obtiene:

$$\sin i' = n \sin r' = 1,50 \cdot \sin 11,9^\circ = 0,309; \quad i' = 18^\circ$$

$$\delta = i + i' - \varphi = 45^\circ + 18^\circ - 40^\circ = 23^\circ$$

**21. Sobre un prisma de vidrio de  $30^\circ$  e índice de refracción  $1,52$  incide un rayo de luz monocromática perpendicularmente a una de sus caras.**

- a) Dibuja la marcha geométrica del rayo.
- b) Calcula el ángulo de desviación.

Como el rayo de luz incide perpendicularmente en la primera cara del prisma, el ángulo de incidencia es igual a  $0^\circ$  y el rayo no sufre desviación,  $r = 0^\circ$ .

El ángulo de incidencia  $i$  en la segunda cara es:

$$n \sin r' = 1 \cdot \sin i'; \quad \sin i' = 1,52 \cdot \sin 30^\circ = 0,76$$

$$i' = 49,5^\circ$$

El ángulo de desviación es:

$$\delta = i + i' - \varphi = 0^\circ + 49,5^\circ - 30^\circ = 19,5^\circ$$

**22. ¿En qué consiste el denominado efecto Doppler en las ondas luminosas?**

En el cambio de frecuencia percibido por el observador cuando él o la fuente luminosa se mueven, acercándose o alejándose uno del otro.

## Otros fenómenos ópticos

**23. ¿El índice de refracción de un prisma óptico es igual para todas las luces? ¿Es mayor para la luz roja o para la luz azul?**

No. Sólo es igual en el vacío.

El índice de refracción es mayor para la luz azul, por eso se refracta más que la luz roja.

**24. Justifica el fenómeno que se produce cuando una onda luminosa se encuentra con una rendija (o un obstáculo) de dimensiones comparables a  $\lambda$ .**

Se producen fenómenos de difracción e interferencias. Los puntos del frente de ondas que no están tapados por el obstáculo se convierten en centros emisores de nuevos frentes de onda, según el principio de Huygens, logrando la onda bordear el obstáculo o contornear las rendijas y propagarse detrás del mismo.

Las rendijas dan lugar al fenómeno de interferencias de Young. En la pantalla se observa un máximo central de luz, alternando con zonas oscuras y zonas de luz debido al fenómeno de interferencias que tienen lugar después de la difracción en la experiencia de las dos rendijas de Young.

**25. ¿Depende el coeficiente de absorción de la frecuencia de la radiación? ¿Es selectiva la absorción?**

Generalmente, el coeficiente de absorción depende de la frecuencia. Un buen ejemplo es el denominado efecto invernadero. Por tanto, la absorción sí es selectiva.

**26. Explica razonadamente por qué es difícil observar los fenómenos de interferencia y difracción en las ondas luminosas.**

Porque es difícil conseguir luces coherentes para apreciar las interferencias, y para que los efectos de la difracción sean observables, el tamaño de la abertura debe ser comparable a la longitud de onda y la de la luz es muy pequeña.

## Aplica lo aprendido

**27. Explica qué debe ocurrir para que una superficie presente los colores blanco, negro o gris.**

Una superficie que absorbe toda la luz que le llega, se verá de color negro. Si refleja toda la luz que incide sobre ella, el color de la superficie será el mismo que el de la luz utilizada: blanco si se ilumina con luz blanca. Las superficies tienen color gris cuando absorben parcialmente todas las frecuencias.

**28. Sabiendo que el índice de refracción del diamante es muy elevado, ¿encuentras alguna razón científica que explique por qué también se les llama brillantes?**

Como el índice de refracción del diamante es muy elevado, el ángulo límite para los medios diamante-aire es muy pequeño ( $24,5^\circ$ ), por eso, cuando un haz de luz penetra en el diamante se producen en sus caras reflexiones internas totales, hasta que el rayo incide en alguna cara con un ángulo inferior al límite; entonces se refracta y sale de nuevo al aire. Parece que la luz procede del diamante mismo y brilla intensamente.

**29. Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de  $30,0^\circ$ .**

a) ¿Qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul, componentes de la luz blanca, si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son, respectivamente, 1,612 y 1,671?

b) ¿Cuáles son los valores de la frecuencia y de la longitud de onda correspondientes a cada una de estas radiaciones en el vidrio, si las longitudes de onda en el vacío son, respectivamente, 656,3 nm y 486,1 nm?

a) Para la luz roja:

$$1 \cdot \sin i = n_R \sin r_R$$

$$\sin r_R = \frac{\sin i}{n_R} = \frac{\sin 30^\circ}{1,612} = 0,3102; \quad r_R = 18,07^\circ$$

Para la luz azul:

$$\sin r_A = \frac{\sin 30^\circ}{1,671} = 0,2992; \quad r_A = 17,41^\circ$$

Ángulo que forman los rayos rojo y azul en el interior del vidrio:

$$\alpha = r_R - r_A = 18,07^\circ - 17,41^\circ = 0,66^\circ$$

b) Las frecuencias son iguales en el aire y en el vidrio:

$$f_R = \frac{c}{\lambda_R} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,563 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$f_A = \frac{c}{\lambda_A} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4,861 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 6,17 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Las longitudes de onda son las siguientes:

$$f_R = \frac{\lambda_0}{n_R} = \frac{6,563 \text{ nm}}{1,612} = 407,1 \text{ nm}$$

$$f_A = \frac{\lambda_0}{n_A} = \frac{4,861 \text{ nm}}{1,671} = 290,9 \text{ nm}$$

**30. ¿Por qué no se observa dispersión cuando la luz blanca atraviesa una lámina de vidrio de caras planas y paralelas?**

En una lámina de caras planas y paralelas, el rayo luminoso que emerge de la lámina es paralelo al rayo incidente; en consecuencia, con luces no monocromáticas que provengan de fuentes no puntuales y dado que están formadas por multitud de rayos paralelos entre sí, el rayo emergente no está disperso, porque las diferentes longitudes de onda, que se propagan dentro de la lámina a distinta velocidad, se reúnen de nuevo a la salida; por ello, la luz emergente es idéntica a la incidente.

**31. Sobre una lámina de vidrio, de índice de refracción  $n = 1,58$  y un espesor de 8,1 mm, incide perpendicularmente un haz de luz de 585 nm de longitud de onda en el vacío.**

a) ¿Cuánto tarda la luz en atravesarla?

b) ¿Cuántas longitudes de onda están contenidas en el espesor de la lámina?

$$a) \quad v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,58} = 1,90 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1};$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,9 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}} = 4,3 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

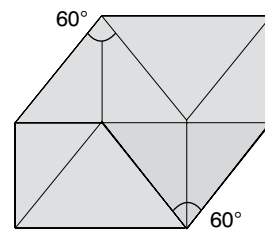
b) Longitud de onda en el vidrio:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{585 \text{ nm}}{1,58} = 370 \text{ nm}$$

Número de ondas:

$$k = \frac{s}{\lambda_v} = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{3,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 2,2 \cdot 10^4 \text{ ondas}$$

**32. A un prisma de vidrio de ángulo  $60^\circ$  e índice de refracción  $n = \sqrt{2}$  se le acopla otro prisma idéntico como indica la figura. Determina el ángulo de emergencia en el segundo prisma, si el ángulo de incidencia en el primer prisma es de  $30^\circ$ .**



El sistema formado por los dos prismas acoplados se comporta como una lámina de caras planas y paralelas. En consecuencia, el rayo emerge paralelo al rayo incidente. El ángulo de emergencia es igual al de incidencia,  $30^\circ$ .

**33. Diseña un circuito eléctrico oscilante capaz de generar ondas electromagnéticas, formado por un generador, una bo-**

**bina y un condensador. Podéis realizar el trabajo en grupo, consultando la bibliografía adecuada, incluido Internet.**

Las ondas electromagnéticas se producen cuando se aceleran los electrones o cualquier otra partícula cargada. Se puede conseguir con un circuito eléctrico oscilante formado por un generador, una bobina y un condensador conectados en serie.

Si el condensador está cargado, entre sus armaduras existirá un campo eléctrico y una diferencia de potencial, que hará circular una corriente por la bobina. A medida que el condensador se descarga, disminuye la intensidad de la corriente y se crea un campo magnético en la bobina, en un proceso reversible.

El valor del campo eléctrico, y también el del campo magnético, oscila entre valores negativos y positivos de forma periódica.

La energía se irradia al exterior separando las armaduras del condensador, constituyendo así una antena emisora.

Esta actividad debe realizarse en equipo y poniendo en común los trabajos realizados.