

Introducción

Actividades

1. ¿Qué tienen de similar y qué tienen de diferente las ondas de radio y el calor y la luz que nos llegan del Sol?

Todas son radiaciones electromagnéticas, pero de distinta longitud de onda (o frecuencia). Las ondas de radio tienen longitudes de onda altas, el calor pequeñas y la luz, muy pequeñas.

Dentro del espectro electromagnético ocupan lugares diferenciados, al igual que los rayos X, los rayos γ , los ultravioleta, los microondas, etc.

2. ¿Por qué vemos los rayos de luz lateralmente cuando atraviesan humo o niebla y no cuando el día está despejado? ¿Tiene que ver con que veamos menos cuando hay niebla?

Los rayos se mueven en línea recta, pero, cuando inciden sobre alguna partícula presente en el aire, se reflejan y eso permite que se vean en otras direcciones. Al producirse el fenómeno en la niebla, la cantidad de luz que sigue atravesando el material sin desviarse es menor, por lo que se iluminan menos los objetos que se encuentran dentro de la niebla y, por tanto, se ven menos.

3. ¿Cómo es posible que la luz siga las curvas de un cable de fibra óptica si se propaga en línea recta?

Porque dentro del cable hay un núcleo cilíndrico con un índice de refracción mayor que el de la corona cilíndrica que lo rodea haciendo de capa externa. Al tocar los rayos de luz la superficie de separación entre ambos medios, con un ángulo de incidencia prácticamente de 90° , se produce la reflexión total y el rayo se mantiene, sin pérdidas, dentro del cable óptico.

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 ϵ_0 y de la permeabilidad magnética del vacío μ_0 , comprueba que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

$$K = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \quad ; \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4 \pi K} = \frac{1}{4 \pi \times 9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}} \quad ; \quad \mu_0 = 4 \pi K' = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

$$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{1}{\frac{1}{4 \pi \times 9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}} \times 4 \pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}} = \frac{1}{\frac{10^{-7} \text{ N A}^{-2}}{9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}}} = 9,0 \times 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$\sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{9,0 \times 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}.$$

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

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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 (Figura 8.1 del libro de texto).

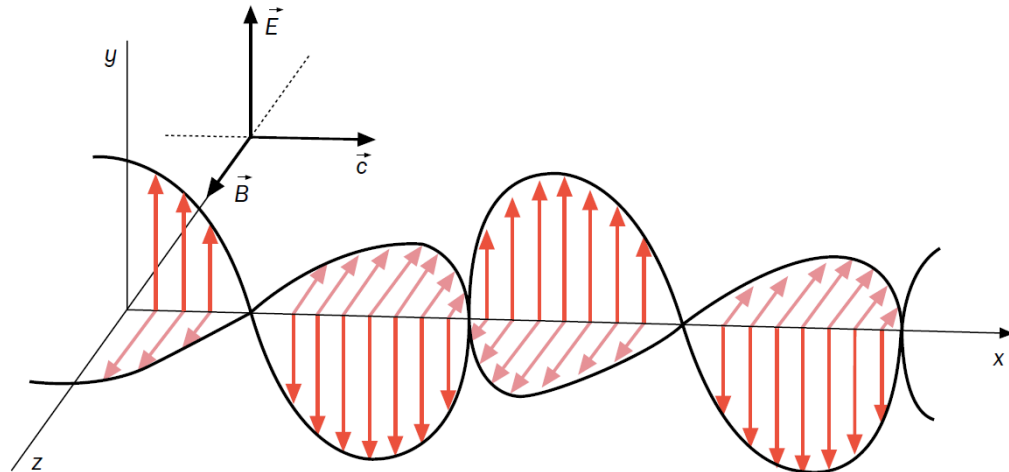


Fig. 8.1. Campos eléctrico y magnético en una onda electromagnética.

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

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,5 \times 10^{-2} \text{ m}} = 1,2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}} \approx 8,3 \times 10^{-11} \text{ s}.$$

Se trata de una onda de radio corta.

6. ¿Por qué los rayos infrarrojos y los ultravioletas reciben ese 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:

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

8 Ondas electromagnéticas. La luz

$$E = h f = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ m s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{520 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} \approx 3,83 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

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

$$E = h f = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ m s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{581 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} \approx 3,42 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

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. Fue defendida por Newton y también recibió los aportes de Einstein.

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

Ambas teorías coinciden en la propagación rectilínea, en la reflexión y en la teoría del color de la luz.

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: $E = h f$.

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 radiación electromagnética central emitida.

Para el Sol:

$$E = h f = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ m s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{500 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} \approx 3,98 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Para Sirio:

$$E = h f = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ m s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{300 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} = 6,63 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Para Betelgeuse:

$$E = h f = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ m s} \times 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{900 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} = 2,21 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

8 Ondas electromagnéticas. La luz

11. La estrella Alfa (Próxima Centauri C) de la constelación Centauro es la estrella más cercana a la Tierra. Se encuentra a 4,22 años luz. ¿A qué distancia se sitúa en kilómetros?

$$s = ct = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \times (4,22 \times 365 \times 24 \times 3600) \text{ s} \approx 4,00 \times 10^{16} \text{ m} = 4,00 \times 10^{13} \text{ km}.$$

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?

$$t = \frac{s}{c} = \frac{1,500 \times 10^8 \text{ km}}{3,00 \times 10^5 \text{ km s}^{-1}} = 500 \text{ s} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \approx 8 \text{ min y } 20 \text{ s}.$$

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

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

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

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

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

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) En caso afirmativo, calcula los valores correspondientes.

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

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

Las longitudes de onda en el agua son:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,3} \approx 2,3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$
$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2,3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} \approx 5,7 \times 10^{-7} \text{ m} \quad ; \quad \lambda_{\text{mín}} = \frac{2,3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{7 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} \approx 3,3 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

8 Ondas electromagnéticas. La luz

15. El índice de refracción absoluto del diamante es 2,38 para una luz cuya longitud de onda es de 620 nm en el aire. Calcula:

a) La velocidad de esa luz en el diamante.

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,38} \approx 1,26 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}.$$

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

$$\lambda_D = \frac{\lambda_0}{n_D} = \frac{620 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}}{2,38} \approx 2,61 \times 10^{-7} \text{ m} = 261 \text{ nm}.$$

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

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{620 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} = 4,84 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}.$$

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

No tienen unidades ya que el índice de refracción absoluto es el cociente entre dos velocidades y 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° . ¿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:

$$\text{sen } r = \frac{n_1 \times \text{sen } i}{n_2} = \frac{1 \times \text{sen } 30^\circ}{1,54} \approx 0,325 \quad ; \quad r \approx 18,9^\circ.$$

18. Cuando 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:

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

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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 plana de vidrio de un acuario con un ángulo de incidencia de 30° . Determina:

Dato: índice de refracción del aire $n = 1$.

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

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad ; \quad \sin r = \frac{n_1 \sin i}{n_2} = \frac{1,00 \times \sin 30^\circ}{1,50} \approx 0,333 \quad ; \quad r \approx 19,5^\circ.$$

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

La frecuencia de una onda no cambia al pasar de un medio a otro, por lo que no lo hará ni al entrar en el vidrio, ni al entrar en el agua. La longitud de onda en el agua es:

$$\lambda_{\text{agua}} n_{\text{agua}} = \lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}} \quad ; \quad \lambda_{\text{agua}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{600 \text{ nm} \times 1,00}{1,33} \approx 451 \text{ nm}.$$

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

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

El ángulo de reflexión será de 30° y el de refracción:

$$180^\circ - (30^\circ + 128^\circ) = 22^\circ$$

$$1 \times \sin 30^\circ = n_{\text{agua}} \times \sin 22^\circ \quad ; \quad n_{\text{agua}} = 1,33.$$

$$v = \frac{c}{n_{\text{agua}}} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,33} \approx 2,26 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}.$$

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?

$$n_{\text{agua}} \sin \ell = n_{\text{aire}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{aire}} \sin 90^\circ}{n_{\text{agua}}} = \frac{1 \times 1}{1,33} \approx 0,752 \quad ; \quad \ell \approx 48,8^\circ.$$

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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° . 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:

$$n_1 \operatorname{sen} i_1 = n_2 \operatorname{sen} r_1$$
$$\operatorname{sen} r_1 = \frac{n_1 \operatorname{sen} i_1}{n_2} = \frac{1 \times \operatorname{sen} 20^\circ}{1,50} \approx 0,228 \quad ; \quad r_1 \approx 13,2^\circ.$$

El desplazamiento lateral es:

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

La distancia recorrida por la luz en el interior de la lámina, x , es la siguiente:

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

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

a) El ángulo de emergencia del rayo de luz.

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

$$n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i = n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} r \quad ; \quad \operatorname{sen} r = \frac{n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{1 \times \operatorname{sen} 45^\circ}{1,51} \approx 0,468 \quad ; \quad r \approx 27,9^\circ.$$

Como el ángulo del prisma es de 40° , se cumple: $r' = \varphi - r \approx 40^\circ - 27,9^\circ = 12,1^\circ$.

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

$$n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} r' = n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i' \quad ; \quad \operatorname{sen} i' = \frac{n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} r'}{n_{\text{aire}}} = \frac{1,51 \times \operatorname{sen} 12,1^\circ}{1,00} \approx 0,317 \quad ; \quad i' \approx 18,5^\circ.$$

b) El ángulo de desviación sufrido por el rayo.

Como $d = i + i' - \varphi$, resulta: $\delta \approx 45^\circ + 18,5^\circ - 40^\circ = 23,5^\circ$.

8 Ondas electromagnéticas. La luz

23. ¿Se propagan todas las luces en el vidrio con la misma velocidad? ¿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; sólo se mueven a la misma velocidad 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:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

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 azul verdoso. Si se iluminara con luz violeta, que es el color opuesto, no se vería puesto que se percibiría como un objeto de 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.

8 Ondas electromagnéticas. La luz

Cuando se mezclan pigmentos (pinturas) siempre se resta luz, por lo que se denomina mezcla sustractiva. Al mezclar pigmentos rojo, verde y azul no se obtiene color blanco; al contrario, se obtiene color negro. Si consideramos pigmentos, 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:

$$I = I_0 e^{-a \times x}$$

Siendo a el coeficiente de absorción y x el espesor atravesado.

$$I = I_0 e^{-a \times x} \quad ; \quad \frac{I}{I_0} = e^{-a \times x} \quad ; \quad \ln \frac{I}{I_0} = -a \times x$$

$$a = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x}$$

$$a = -\frac{\ln \left(\frac{100 - 5,2}{100} \right) \times I_0}{3,4 \text{ cm} \times 10^{-2} \text{ cm m}^{-1}} = -\frac{\ln(1 - 0,052)}{3,4 \text{ cm} \times 10^{-2} \text{ cm m}^{-1}} \approx 1,6 \text{ m}^{-1}.$$

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° :

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

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

$$n \times \sen i = n_a \times \sen r \quad ; \quad 1 \times \sen i = 1,33 \times \sen(90^\circ - i) \quad ; \quad \sen i = 1,33 \times \cos i$$
$$\tg i = 1,33 \quad ; \quad i \approx 53,1^\circ.$$

8 Ondas electromagnéticas. La luz

Ciencia, tecnología y sociedad

Cuestiones

1. Haz una presentación con los objetivos de todos los ODS relacionados con este texto.

Respuesta abierta. Los ODS se encuentran en la página:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> y es interesante comprobar qué tipo de relaciones han encontrado entre los ODS y esta unidad, aparte de la más obvia, que sería el ODS 9, Industria, innovación e infraestructura.

2. El índice de refracción del núcleo de una fibra óptica es 1,62, y el de su superficie 1,48. ¿Qué ángulos de incidencia producen la reflexión total (utiliza lo que has estudiado en la unidad)?

El ángulo límite entre el núcleo de la fibra óptica y el de su cubierta es:

$$n_{\text{núcleo}} \sin \ell = n_{\text{cubierta}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{cubierta}} \sin 90^\circ}{n_{\text{núcleo}}} = \frac{1,48 \times 1}{1,62} \approx 0,914 \quad ; \quad \ell \approx 66^\circ.$$

El ángulo límite entre la cubierta del núcleo y el exterior (aire), si no tuviera el cable de fibra cubierta plástica, sería:

$$n_{\text{cubierta}} \sin \ell = n_{\text{aire}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{aire}} \sin 90^\circ}{n_{\text{cubierta}}} = \frac{1,00 \times 1}{1,48} \approx 0,676 \quad ; \quad \ell \approx 42,5^\circ.$$

3. ¿Cuáles de los métodos de transmisión de información que se han usado a lo largo de la historia tienen relación directa con la luz?

Respuesta abierta. Aunque todas tienen relación con la luz (la visión resulta fundamental en todos los procesos) de las enunciadas en el texto, tienen una relación directa con la información emitida y recibida a partir de impulsos electromagnéticos, el telégrafo óptico, la fibra óptica y el láser a través de torres.

4. ¿Realmente el sistema de láser por medio de torres es más rápido que la fibra óptica? Razona en qué pasos de cada uno de los dos tipos de conexión se lentifica el proceso.

8 Ondas electromagnéticas. La luz

Respuesta abierta. Es evidente que el proceso de comunicación por láser a través de torres se lentifica en cada torre cuando se convierte la señal láser en una señal eléctrica que se amplifica en otra señal láser, mientras que por fibra óptica solo se lentifica en el proceso de creación de la señal y en el final de conversión de la señal en información. A veces, en medio de la comunicación, es necesario amplificarla también, pero a mayor distancia.

Actividades finales

Ondas electromagnéticas

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

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,5 \times 10^{-2} \text{ m}} = 1,2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \quad ; \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}} \approx 8,3 \times 10^{-11} \text{ s}.$$

Se trata de una onda de radio corta.

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

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

Las frecuencias superior e inferior son:

$$f_{\text{inf}} = \frac{c}{\lambda_{\text{may}}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{200 \text{ m}} = 1,5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$
$$f_{\text{sup}} = \frac{c}{\lambda_{\text{men}}} = \frac{3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{50 \text{ m}} = 6,0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}.$$

La banda de frecuencias de emisión está entre 1,5 y 6 MHz.

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

Todas las ondas electromagnéticas se propagan a la misma velocidad si se encuentran en el mismo medio: si es el vacío, la velocidad es $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

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.

$$E_0 = 8 \text{ N C}^{-1} \quad ; \quad f = 1 \times 10^6 \text{ Hz} \quad ; \quad T = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$$
$$\lambda = c T = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \times 1 \times 10^{-6} \text{ s} = 3 \times 10^2 \text{ m}.$$

Al introducir estos valores en las ecuaciones de onda de los campos se obtiene:

8 Ondas electromagnéticas. La luz

$$E = 8 \text{ N C}^{-1} \times \sin 2 \pi \left(\frac{t}{10^{-6}} - \frac{x}{3 \times 10^2} \right)$$
$$B = \frac{E}{c} = \frac{8 \text{ N C}^{-1} \times \sin 2 \pi \left(\frac{t}{10^{-6}} - \frac{x}{3 \times 10^2} \right)}{3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} \approx 2,7 \times 10^{-8} \text{ T} \times \sin 2 \pi \left(\frac{t}{10^{-6}} - \frac{x}{3 \times 10^2} \right).$$

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 $7,50 \times 10^8 \text{ MHz}$?

$$E_{\text{violeta}} = h f_{\text{violeta}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s} \times 7,5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \approx 4,97 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

La energía de un fotón GSM es:

$$E_{\text{GSM}} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s} \times 900 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \approx 5,97 \times 10^{-25} \text{ J}.$$

El número de fotones GSM es:

$$n = \frac{E_{\text{violeta}}}{E_{\text{GSM}}} \approx \frac{4,97 \times 10^{-19} \text{ J}}{5,97 \times 10^{-25} \text{ J}} \approx 8,32 \times 10^5 \text{ fotones}.$$

Naturaleza y velocidad de la luz

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. No conocemos ningún fenómeno donde se comporte con las dos naturalezas.

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

a) ¿Cuáles son su periodo y su frecuencia?

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{5,8 \times 10^{-7} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} \approx 1,93 \times 10^{-15} \text{ s} \quad ; \quad f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{1,93 \times 10^{-15} \text{ s}} \approx 5,17 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}.$$

b) ¿De qué color es?

Es una luz amarilla.

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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?

$$x = c t = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \times (16 \times 365,25 \times 24 \times 3600) \text{ s} = 1,5 \times 10^{17} \text{ m} = 1,5 \times 10^{14} \text{ km}.$$

Índice de refracción

8. Una lámina de vidrio de 0,500 cm de espesor tiene un índice de refracción de 1,48 para determinado rayo de luz. ¿Cuánto tiempo tarda este rayo en atravesarla perpendicularmente?

La velocidad de la luz en este vidrio es:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,48} \approx 2,03 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad ; \quad t = \frac{s}{v} \approx \frac{5 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,03 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} \approx 2,46 \times 10^{-11} \text{ s}.$$

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?

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,31} \approx 2,29 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}.$$

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

$$\lambda_{\text{hielo}} n_{\text{hielo}} = \lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}} \quad ; \quad \lambda_{\text{hielo}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}}}{n_{\text{hielo}}} = \frac{589 \text{ nm} \times 1,00}{1,31} \approx 450 \text{ nm}.$$

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?

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

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

Su frecuencia es la misma que en el aire:

8 Ondas electromagnéticas. La luz

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{625 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} = 4,8 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

$$\lambda_{\text{agua}} n_{\text{agua}} = \lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}} \quad ; \quad \lambda_{\text{agua}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{625 \text{ nm} \times 1,00}{1,33} \approx 470 \text{ nm.}$$

11. Los índices de refracción absolutos del diamante y del rubí, para 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.

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

Reflexión y refracción de la luz

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

a) El valor del ángulo de refracción.

$$n_{\text{agua}} \sin i = n_{\text{aire}} \sin r \quad ; \quad \sin r = \frac{n_{\text{agua}} \sin i}{n_{\text{aire}}} = \frac{1,33 \times \sin 30,0^\circ}{1,00} = 0,665 \quad ; \quad r \approx 41,7^\circ.$$

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

$$n_{\text{agua}} \sin \ell = n_{\text{aire}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{aire}} \sin 90^\circ}{n_{\text{agua}}} = \frac{1 \times 1}{1,33} \approx 0,752 \quad ; \quad \ell \approx 48,8^\circ.$$

Para ángulos de incidencia mayores que $48,8^\circ$ no se produce refracción ya que 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:

$$n_{\text{aire}} \sin i = n_{\text{agua}} \sin r \quad ; \quad \sin r = \frac{n_{\text{aire}} \sin i}{n_{\text{agua}}} = \frac{1,00 \times \sin 35^\circ}{1,33} \approx 0,431 \quad ; \quad r \approx 25,6^\circ.$$

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

8 Ondas electromagnéticas. La luz

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{695 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} = 4,32 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

La longitud de onda en el agua es:

$$\lambda_{\text{agua}} n_{\text{agua}} = \lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}} \quad ; \quad \lambda_{\text{agua}} = \frac{\lambda_{\text{aire}} n_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{695 \text{ nm} \times 1,00}{1,33} \approx 523 \text{ nm.}$$

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?

$$n_{\text{benceno}} \sin \ell = n_{\text{agua}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{agua}} \sin 90^\circ}{n_{\text{benceno}}} = \frac{1,33 \times 1}{1,50} \approx 0,887 \quad ; \quad \ell \approx 62,5^\circ.$$

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:

$$n_{\text{agua}} \sin \ell = n_{\text{benceno}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{benceno}} \sin 90^\circ}{n_{\text{agua}}} = \frac{1,50 \times 1}{1,33} \approx 1,13 \Rightarrow \ell \text{ no existe.}$$

15. Sobre la superficie de un bloque de vidrio, cuyo índice de refracción es 1,60. 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.

$$n_{\text{vidrio}} \sin \ell = n_{\text{agua}} \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_{\text{agua}} \sin 90^\circ}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{1,33 \times 1}{1,60} \approx 0,831 \quad ; \quad \ell \approx 56,2^\circ.$$

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 .

a) 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.

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:

$$n_1 \sin \ell = n_2 \sin 90^\circ \quad ; \quad \sin \ell = \frac{n_2 \sin 90^\circ}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \ell = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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

$$\sin \ell = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,2}{1,5} = 0,8 \quad ; \quad \ell \approx 53^\circ.$$

17. Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque con un ángulo de incidencia de 20° . ¿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: $n_{\text{aire}} = 1,00$; $n_{\text{agua}} = 1,34$.

El ángulo de reflexión es también de 20° y el ángulo de refracción es:

$$n_{\text{aire}} \sin i = n_{\text{agua}} \sin r \quad ; \quad \sin r = \frac{n_{\text{aire}} \sin i}{n_{\text{agua}}} = \frac{1,00 \times \sin 20^\circ}{1,34} \approx 0,255 \quad ; \quad r \approx 15^\circ.$$

El ángulo formado por los rayos reflejado y refractado es:

$$\alpha \approx 180^\circ - (20^\circ + 15^\circ) = 145^\circ.$$

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).

Lámina de caras planas y paralelas y prisma óptico

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

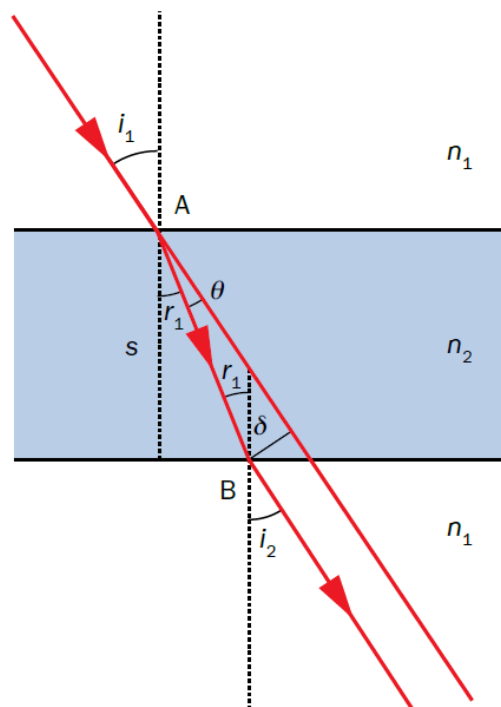
El ángulo de emergencia es igual al de incidencia: 35° .

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 $1,5$ 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° .

a) Dibuja la marcha geométrica del rayo.

8 Ondas electromagnéticas. La luz



b) Comprueba que el ángulo de incidencia es igual que el ángulo de emergencia.

Aplicando la ley de Snell de la refracción a las dos caras y teniendo en cuenta que el ángulo r_1 es igual al ángulo r_2 (ángulos comprendidos entre paralelas):

$$\left. \begin{array}{l} n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i_1 = n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} r_1 \\ n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i_2 = n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} r_2 \\ r_1 = r_2 \end{array} \right\} \quad n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i_1 = n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i_2 \quad ; \quad \operatorname{sen} i_1 = \operatorname{sen} i_2 \quad ; \quad i_1 = i_2.$$

c) Determina la distancia recorrida dentro de la lámina por el rayo y el desplazamiento lateral del rayo emergente.

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

$$n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i = n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} r \quad ; \quad \operatorname{sen} r = \frac{n_{\text{aire}} \operatorname{sen} i}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{1,00 \times \operatorname{sen} 30^\circ}{1,58} \approx 0,316 \quad ; \quad r \approx 18,4^\circ.$$

El desplazamiento lateral es el siguiente:

$$\delta = s \frac{\operatorname{sen}(i_1 - r_1)}{\cos r_1} \approx 1,5 \text{ cm} \times \frac{\operatorname{sen}(30^\circ - 18,4^\circ)}{\cos 18,4^\circ} \approx 0,32 \text{ cm}.$$

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

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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

20. Sobre un prisma de vidrio de ángulo 40° e índice de refracción 1,50 incide un rayo de luz monocromática. Si el ángulo de incidencia es de 45° , 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:

$$n_{\text{aire}} \sin i = n_{\text{vidrio}} \sin r \quad ; \quad \sin r = \frac{n_{\text{aire}} \sin i}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{1,00 \times \sin 45^\circ}{1,50} \approx 0,471 \quad ; \quad r \approx 28,1^\circ.$$

Como el ángulo del prisma es de 40° , se cumple:

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

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

$$n_{\text{aire}} \sin i' = n_{\text{vidrio}} \sin r' \quad ; \quad \sin i' = \frac{n_{\text{vidrio}} \sin r'}{n_{\text{aire}}} \approx \frac{1,50 \times \sin 11,9^\circ}{1,00} \approx 0,309 \quad ; \quad i' \approx 18,0^\circ$$
$$\delta = i + i' - \varphi = 45^\circ + 18^\circ - 40^\circ = 23^\circ.$$

21. Sobre un prisma de vidrio de 30° 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.

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

El ángulo de incidencia r' en la segunda cara es: $r' = \varphi - r = 30^\circ - 0^\circ = 30^\circ$.

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

$$n_{\text{aire}} \sin i' = n_{\text{vidrio}} \sin r' \quad ; \quad \sin i' = \frac{n_{\text{vidrio}} \sin r'}{n_{\text{aire}}} \approx \frac{1,52 \times \sin 30^\circ}{1,00} = 0,76 \quad ; \quad i' \approx 49,5^\circ.$$

b) Calcula el ángulo de desviación.

El ángulo de desviación es:

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

8 Ondas electromagnéticas. La luz

Otros fenómenos ópticos

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.

La frecuencia se puede obtener aplicando la ecuación:

$$f' = f \frac{v \pm v_o}{v \pm v_f} ; \quad f = f' \frac{v \pm v_f}{v \pm v_o}$$

Donde v_f es la velocidad de la fuente que genera el sonido (con signo + cuando se aleja del observador y signo - si se acerca) y v_o es la velocidad del observador que lo percibe (con signo + cuando se acerca a la fuente y signo - si se está alejando de ella).

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 (estrictamente deberíamos hablar de frecuencias y no de luces). Sólo es igual para todas las frecuencias cuando el medio por el que se mueven es el vacío.

El índice de refracción es mayor para la luz azul, por eso se refracta más que la luz roja, porque varía con la inversa de la longitud de onda, que es menor en el caso de la luz azul.

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

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?

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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. Busca en Internet ejemplos de fenómenos de interferencia y difracción habituales en nuestro entorno y cómo se producen.

Respuesta abierta. La ausencia de sonido en determinados puntos de una sala o que se oiga mucho mejor en otros, los arcoíris de la luz en las manchas de gasolina o en el borde de un espejo, etc.

No es habitual observar fenómenos de interferencia asociados a la luz, 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 $30,0^\circ$.

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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?

Para la luz roja:

$$n_{\text{aire}} \sen i = n_{\text{rojo}} \sen r ; \sen r = \frac{n_{\text{aire}} \sen i}{n_{\text{rojo}}} = \frac{1,000 \times \sen 30,0^\circ}{1,612} = 0,3102 \quad ; \quad r_{\text{R}} \approx 18,07^\circ.$$

Para la luz azul:

$$n_{\text{aire}} \sen i = n_{\text{azul}} \sen r ; \sen r = \frac{n_{\text{aire}} \sen i}{n_{\text{azul}}} = \frac{1,000 \times \sen 30,0^\circ}{1,671} = 0,2992 \quad ; \quad r_{\text{A}} \approx 17,41^\circ.$$

El ángulo que forman los rayos rojo y azul en el interior del vidrio es:

$$\delta = r_{\text{R}} - r_{\text{A}} = 18,07^\circ - 17,41^\circ = 0,66^\circ.$$

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?

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

$$f_{\text{R}} = \frac{c}{\lambda_{\text{R}}} = \frac{2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{6,563 \times 10^{-7} \text{ m}} \approx 4,568 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \quad f_{\text{A}} = \frac{c}{\lambda_{\text{A}}} = \frac{2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{4,861 \times 10^{-7} \text{ m}} = 6,167 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}.$$

Y las longitudes de onda son las siguientes:

$$\lambda_{\text{R}} = \frac{\lambda_0}{n_{\text{R}}} = \frac{656,3 \text{ nm}}{1,612} \approx 407,1 \text{ nm} \quad ; \quad \lambda_{\text{A}} = \frac{\lambda_0}{n_{\text{A}}} = \frac{486,1 \text{ nm}}{1,671} = 290,9 \text{ nm}.$$

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, 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 está agrupada de forma idéntica a la de la luz incidente.

8 Ondas electromagnéticas. La luz

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?

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{1,58} \approx 1,90 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} ; \quad t = \frac{s}{v} \approx \frac{8,1 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,90 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}} \approx 4,3 \times 10^{-11} \text{ s}.$$

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

Longitud de onda en el vidrio:

$$\lambda_{\text{vidrio}} n_{\text{vidrio}} = \lambda_{\text{vacío}} n_{\text{vacío}} ; \quad \lambda_{\text{vidrio}} = \frac{\lambda_{\text{vacío}} n_{\text{vacío}}}{n_{\text{vidrio}}} = \frac{585 \text{ nm} \times 1,00}{1,58} \approx 370 \text{ nm}.$$

Número de ondas dentro de la lámina:

$$k = \frac{s}{\lambda_v} = \frac{8,1 \text{ mm} \times 10^{-3} \text{ m mm}^{-1}}{370 \text{ nm} \times 10^{-9} \text{ m nm}^{-1}} \approx 2,2 \times 10^4 \text{ ondas}.$$

32. A un prisma de vidrio de ángulo 60° e índice de refracción $n = \sqrt{2}$ se le acopla otro prisma idéntico como indica la Figura 8.34. Determina el ángulo de emergencia en el segundo prisma, si el ángulo de incidencia en el primer prisma es de 30° .

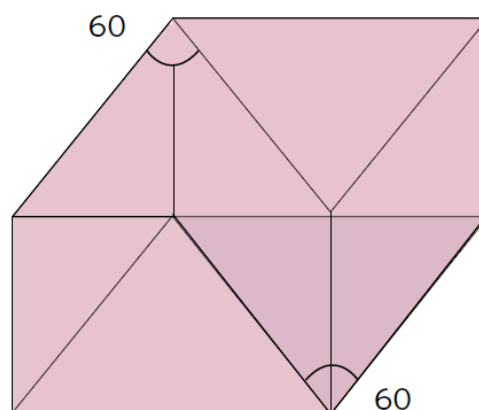


Fig. 8.34. Prismas acoplados.

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° .

8 Ondas electromagnéticas. La luz

33. Diseña un circuito eléctrico oscilante sencillo capaz de generar ondas electromagnéticas, formado por un generador, una bobina 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.