

Cuestiones previas (página 256)

- ¿Por qué se habla de la naturaleza dual de la luz?
Se habla de naturaleza dual debido a su doble naturaleza: corpuscular y ondulatoria.
- ¿Se propaga la luz a la misma velocidad en todos los medios? ¿A qué se llama índice de refracción?
No se propaga a la misma velocidad porque depende del medio en el que se propaga. El índice de refracción es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio.
- ¿Qué principio ilustra el funcionamiento de las fibras ópticas?
El principio de la de la reflexión total interna.
- ¿Por qué algunas sustancias son transparentes y otras son opacas?
Depende de la interacción de la luz con la materia desde un punto de vista ondulatorio. Así, las sustancias transparentes transmiten todas las radiaciones hasta emerger por el lado opuesto. En cambio, los materiales opacos reflejan todas las radiaciones.
- ¿A qué se deben los colores de los cuerpos?
Se debe a la absorción selectiva. Un determinado color se forma cuando un material iluminado con luz blanca absorbe todas las radiaciones salvo la correspondiente a ese color.
- ¿Por qué el cielo se ve azul durante el día?
Se debe a un fenómeno llamado esparcimiento de la luz que consiste en que la intensidad esparcida es considerablemente mayor en el azul y el violeta que en el rojo. Como nuestra sensibilidad al azul es mucho mayor que al violeta, por este motivo el color del cielo que observamos es azul.

Actividades (páginas 259/281)

- ¿Qué fenómenos relativos a la luz pueden ser explicados desde el punto de vista corpuscular y cuáles no?
Desde el punto de vista corpuscular pueden explicarse la reflexión (asumiendo que los corpúsculos colisionan de forma elástica contra la superficie de separación de los dos medios) y la refracción. Sin embargo, no pueden explicarse ni la difracción ni la polarización ni las interferencias.
- Teniendo en cuenta el valor obtenido por Fizeau para la velocidad de la luz y los datos referidos a su dispositivo, determina a qué velocidad angular en rps y en rad/s giraba la rueda cuando el pulso reflejado se hacía visible.
En el tiempo que tarda el pulso de luz en recorrer los 17 266 m de ida y vuelta, la rueda dentada habrá girado 1/720 de vuelta. Con el valor de velocidad obtenido por Fizeau, el tiempo empleado por el pulso será:
$$t = \frac{d}{v} = 5,516 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Por tanto, la velocidad angular de la rueda en revoluciones por segundo será:
$$\omega = \frac{1/720 \text{ revoluciones}}{5,516 \cdot 10^{-5} \text{ s}} = 25,18 \text{ rps}$$

valor que, multiplicado por 2π , nos da la velocidad de la rueda en rad/s:
$$\omega = 25,18 \cdot 2\pi = 158,13 \text{ rad/s}$$

- Considerando el valor actual de la luz, y teniendo en cuenta que la distancia media Tierra-Sol es de $1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$, trata de estimar la diferencia de períodos de Ío, observado desde el punto más próximo y más distante de nuestra órbita.
Tomando $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ como velocidad de la luz, y teniendo en cuenta que la diferencia de períodos se debe al tiempo que tarda la luz en recorrer el diámetro de la órbita terrestre ($D = 2 \cdot d_{T-S}$), dicha diferencia será:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d_{T-S}}{c} = 997,3 \text{ s} = 16 \text{ min } 37 \text{ s}$$

- ¿Qué ocurrirá si el rayo incidente es perpendicular a la superficie de separación de dos medios?
En ese caso no se produce ninguna desviación del rayo refractado. La razón es evidente si se considera la igualdad:
$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r}$$

Si $\sin \hat{i} = 0$, debe cumplirse también que $\sin \hat{r} = 0$.
- ¿Se producirá refracción si el ángulo de incidencia se aproxima a 90° ?
Sí se producirá refracción, siempre que el índice de refracción del medio de incidencia sea menor que el del medio de refracción, como ocurre si el rayo pasa del aire al agua, por ejemplo. En esas condiciones, si $\sin \hat{i} = 1$ ($\hat{i} = 90^\circ$), entonces:

$$n_1 = n_2 \sin \hat{r} \Rightarrow \sin \hat{r} = \frac{n_1}{n_2}$$

Como se observa, la exigencia de que $\sin \hat{r}$ pueda valer como máximo 1 implica que $n_2 \geq n_1$.

- PAU** Un haz fino de luz amarilla de sodio de 589 nm pasa de propagarse en el aire ($n = 1,000 293$) a hacerlo en cristal de cuarzo. Cuando el ángulo de incidencia es de 30° , se observa que el de refracción es de $18,9^\circ$. Determina:
 - El índice de refracción del cristal de cuarzo para esa luz.
 - La velocidad a la que se propaga dicha luz en el cuarzo.
 - La longitud de onda en el nuevo medio.
- a) De la ley de Snell se desprende que:

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = 1,544$$

- b) De la definición del índice de refracción obtenemos lo siguiente:

$$v_2 = \frac{c}{n_2} = 1,943 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- c) La longitud de onda en el nuevo medio se obtiene a partir de la expresión 10.6:

$$\lambda' = \lambda \frac{n_1}{n_2} = 381,59 \text{ nm}$$

- ¿Qué ocurrirá cuando un haz de luz incide con cierto ángulo sobre una superficie de separación de dos medios si el segundo medio tiene menor índice de refracción? ¿Podemos garantizar que siempre se producirá refracción?
Si el segundo medio tiene un índice $n_2 < n_1$, entonces $\sin \hat{r} > \sin \hat{i}$, es decir, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. Puede llegar un momento en el que $\hat{r} = 90^\circ \Rightarrow \sin \hat{r} = 1$. Esto ocurrirá cuando:

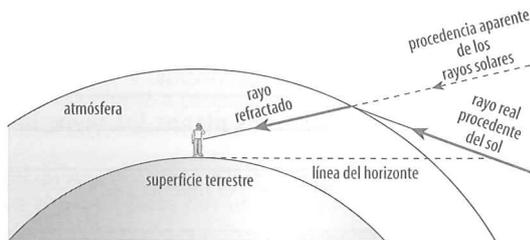
$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \Rightarrow \sin \hat{i} = \frac{n_2}{n_1}$$

Como $n_2 < n_1$, sí existe un ángulo de incidencia para el que ya no se produce refracción. Luego, no podemos garantizar que siempre se produzca refracción.

- 8) Suele decirse que, cuando observamos un bello atardecer, el Sol hace ya rato que se ocultó realmente. Trata de explicar este fenómeno.

Efectivamente, al pasar la luz solar de propagarse en el medio interplanetario (que se halla prácticamente vacío) a hacerlo en la atmósfera, que tiene un mayor índice de refracción, sufre una desviación, que será tanto mayor cuanto mayor sea \hat{i} .

Como puede verse en la figura, el Sol, que está por debajo de la línea del horizonte, es, sin embargo, visible antes de su salida o después de su puesta en virtud de este fenómeno de refracción, ya que el ojo sitúa su imagen en la prolongación de los rayos que le alcanzan.



Esto ocurre fundamentalmente al atardecer y cuando amanece.

- 9) Teniendo en cuenta el fenómeno de la refracción, responde de forma razonada a las siguientes preguntas:

- a) ¿Sufre desviaciones la luz al pasar de un medio a otro si ambos tienen distinto índice de refracción?
 b) ¿Cambia la luz de velocidad de propagación al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción?
 a) Efectivamente, debido al cambio de velocidad que sufre la luz al pasar de un medio a otro, varía también la dirección de propagación.
 b) Por la propia definición del índice de refracción, si dos medios tienen distinto índice de refracción, la luz se propagará con diferente velocidad en ellos.

- 10) **PAU** Una lámina de vidrio de caras planas y paralelas, suspendida en el aire, tiene un espesor de 8 cm y un índice de refracción de 1,6. En la cara superior de la lámina incide un rayo de luz monocromática con un ángulo de 45° .

- a) Calcula los valores correspondientes del ángulo de refracción en el interior de la lámina y del ángulo de emergencia.
 b) Determina el desplazamiento lateral experimentado al atravesar la lámina.
 c) Dibuja la trayectoria geométrica del rayo.
 a) El ángulo de refracción en el interior del vidrio se obtiene por la ley de Snell:

$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r}$$

de donde:

$$\sin \hat{r} = \frac{n_1 \sin \hat{i}}{n_2} = \frac{1,000293 \cdot \sin 45^\circ}{1,6}$$

$$\sin \hat{r} = 0,44$$

Por tanto:

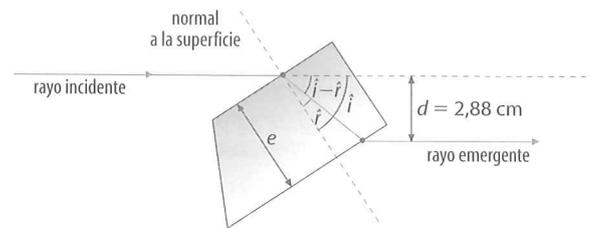
$$\hat{r} = 26,10^\circ$$

El ángulo de emergencia es igual al de incidencia, es decir, de 45° .

- b) El desplazamiento lateral que experimenta el rayo al atravesar la lámina de vidrio es:

$$d = e \frac{\sin(\hat{i} - \hat{r})}{\cos \hat{r}} = 2,88 \text{ cm}$$

- c) La trayectoria geométrica del rayo es:



- 11) Si observas un objeto rojo a través de un filtro transparente azul-verdoso, ¿de qué color se verá?

El objeto rojo se verá negro, pues el filtro deja pasar el azul y el verde, pero absorbe justamente el rojo.

- 12) **PAU** ¿De qué color veremos una rosa roja iluminada con luz verde?

La luz verde no tiene componente roja. Puesto que la rosa absorbe todos los colores salvo el rojo, al iluminarla con luz verde se verá negra.

- 13) ¿Por qué el humo de los cigarrillos tiene un tono azulado?

El tono azulado se observa cuando el humo sale del cigarro en reposo, pero no si es exhalado. Cuando sale del cigarro en reposo, se cumplen las condiciones del esparcimiento Rayleigh: el pequeño tamaño de las partículas y la gran separación que hay entre ellas hacen que se esparza mayoritariamente la luz azul. Por el contrario, si el humo es exhalado, consta en realidad de vapor de agua condensado sobre las partículas del humo, por lo que estas son ahora demasiado grandes y ocurre un fenómeno similar al explicado para las nubes: el humo se percibe grisáceo-blancuecino.

- 14) Puede explicarse de la manera aquí expuesta el tono azulado de los mares o crees que se debe a otro fenómeno? Busca información al respecto.

El color del mar no puede explicarse mediante el fenómeno del esparcimiento. El color de la superficie se debe en realidad a la reflexión del azul celeste. Sin embargo, hay un hecho que puede comprobarse fácilmente: un bañador de color rojo, bajo el agua, se ve de un tono más apagado. La explicación es que las moléculas de agua tienen frecuencias naturales en el rango del infrarrojo.

No obstante, también resuenan muy débilmente con las frecuencias rojas visibles, por lo que a medida que aumenta la profundidad, el color rojo va siendo absorbido de forma paulatina. De este modo, a unos 30 m, apenas llega la componente roja de la luz solar, por lo que el agua adquiere ese color verde-azulado tan característico y los objetos rojos se ven negros.

Así pues, el tono verde-azulado del mar en las profundidades es un fenómeno de absorción selectiva.

Cuestiones y problemas (páginas 284/285)

Guía de repaso

- 1) ¿Qué fenómenos relativos a la luz pueden ser explicados desde el punto de vista ondulatorio y cuáles no?

Se pueden estudiar la reflexión, refracción, difracción e interferencias. No se pueden estudiar la propagación rectilínea de la luz.

- 2) ¿A qué resultados conducía el tratamiento mecánico corpuscular que daba Newton a la refracción?

Conducía a la ley de la reflexión, es decir, el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales.

3 ¿Qué concepción se tiene hoy en día acerca de la naturaleza de la luz?

Que la naturaleza de la luz es dual.

4 Detalla cómo midió Römer la velocidad de la luz.

Römer estudió las ocultaciones de los satélites galileanos al pasar por detrás del planeta. Centró su atención en Ío y llegó a determinar que, cuando Júpiter se hallaba a la mínima distancia de la Tierra, el tiempo o período entre dos «salidas sucesivas de la sombra» de Ío era de 42 h 28 min, período que se mantenía con asombrosa regularidad.

Sin embargo, si efectuaba la medida cuando la Tierra se encontraba en su posición más alejada de Júpiter, el período se incrementaba en 22 min. Si esa distancia adicional era el diámetro de la órbita terrestre alrededor del Sol (d), la diferencia de períodos era igual al tiempo que tardaba la luz en recorrer esa distancia. Con los datos sobre el diámetro de la órbita terrestre de que se disponía en aquel momento (no demasiado precisos), llegó a establecer la velocidad de la luz.

5 Explica el método de Fizeau para medir la velocidad de la luz. ¿Cuál es la razón por la que la rueda debía tener numerosos dientes?

Su dispositivo constaba básicamente de una rueda dentada giratoria de numerosos dientes y un espejo situado a una cierta distancia. Se mandaba un pulso de luz que, después de pasar entre los dientes de la rueda, llegaba al espejo, donde se reflejaba y emprendía el camino de vuelta. Esto quería decir que el pulso, en su viaje de ida y vuelta había tardado lo mismo que la rueda en girar desde un hueco al siguiente.

Conociendo la velocidad de rotación de la rueda, Fizeau llegó a estimar la velocidad de la luz. La rueda debería tener numerosos dientes para hacer coincidir con el viaje de ida y vuelta de la luz.

6 ¿Cómo se produce una onda electromagnética?

Se produce cuando una carga eléctrica se encuentra oscilando.

7 ¿Qué magnitudes se ven perturbadas en la propagación de una onda electromagnética? ¿Cómo son esas perturbaciones con respecto a la dirección de propagación?

Se ven perturbadas el campo eléctrico y el magnético. Son perpendiculares con respecto a la dirección de propagación.

8 ¿Cómo se relaciona la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío con las propiedades eléctricas y magnéticas del mismo?

A través de la expresión 10.1.

9 ¿Qué es el espectro electromagnético? ¿Cómo se clasifican las ondas de menor a mayor frecuencia?

Se clasifican en siete zonas: radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos γ .

10 ¿Entre qué valores de longitud de onda se encuentran las llamadas ondas de radio? ¿Y las microondas?

Ondas de radio entre 10^3 y 10^4 m. Y las microondas desde 10^{-3} m hasta 21 cm.

11 ¿Cómo se subdividen las ondas electromagnéticas visibles? ¿Entre qué frecuencias se encuentran?

Se subdivide en los famosos colores del arco iris: rojo: 620 a 1 000 nm; verde: 490 a 550 nm; naranja: 590 a 620 nm; azul: 430 a 490 nm; amarillo: 550 a 590 nm; violeta: 390 a 430 nm.

12 ¿Qué fenómenos demuestran inequívocamente la naturaleza ondulatoria de la luz? ¿Por qué?

La interferencia, la difracción y la polarización son fenómenos que solo pueden ser explicados desde una concepción ondulatoria, mientras que la reflexión y la refracción pueden ser entendidos también desde el punto de vista corpuscular.

13 Resume en un mismo esquema las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz.

Ley de la reflexión:

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano, llamado plano de incidencia.
- El ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales.

Ley de refracción:

- El ángulo de refracción depende del ángulo de incidencia.
- El ángulo de refracción depende de la relación entre los índices de refracción de los medios.

14 ¿Se encuentran en distintos planos los rayos incidente, reflejado y refractado?

No, los rayos se encuentran en el mismo plano.

15 Explica el concepto de la reflexión especular y el de la difusa.

Cuando la reflexión es perfecta y el haz luminoso emerge en una sola dirección es la reflexión especular. Cuando las reflexiones se producen en las mismas direcciones es difusa.

16 ¿Qué magnitudes propias de la onda se ven afectadas al pasar esta de un medio a otro que tiene distinto índice de refracción?

La longitud de onda y la velocidad de la luz.

17 ¿A qué llamamos ángulo límite o ángulo crítico? ¿Cómo funcionan las fibras ópticas?

El ángulo límite es el mayor ángulo posible de refracción que tiene lugar cuando la incidencia sea prácticamente rasante. El funcionamiento de las fibras ópticas se basan en la reflexión total.

18 ¿Cómo se producen los espejismos?

Se produce cuando los rayos de luz sufren diversas refracciones que lo alejan progresivamente de su normal, entonces los rayos refractados parecen provenir de una imagen especular.

19 ¿Qué requisitos deben cumplirse para que se produzcan interferencias luminosas? ¿Cómo consiguió Young que se cumplieran esos requisitos?

Las luces deben de ser coherentes, es decir, deben tener la misma frecuencia y una diferencia de fase constante. Young lo consiguió utilizando el experimento de la doble rendija.

20 ¿Por qué es tan difícil observar los fenómenos de difracción de la luz?

Para que la difracción sea observable el tamaño de la abertura debe ser comparable a la longitud de onda de la luz incidente. Este es el motivo por el cual es tan difícil observar la difracción.

21 ¿Por medio de qué fenómeno queda demostrada la polarización de la luz?

Por la absorción de la luz.

22 ¿En qué consiste la dispersión de la luz? ¿Y la absorción?

La dispersión de la luz se produce cuando un medio presenta una dependencia entre el índice de refracción y la frecuencia. Debido a esta dependencia cuando la luz blanca incide sobre un prisma, cada color sufrirá su refracción particular en distinto ángulo. Al salir del prisma sufrirá una segunda refracción, distinguiéndose los colores claramente divididos.

La absorción se produce cuando incide la luz sobre un material, parte de esa energía se transforma en interna y parte vuelve a ser emitida.

23 ¿A qué llamamos materiales opacos? ¿Y a los materiales transparentes?

Los materiales transparentes transmiten todas las radiaciones, en cambio los materiales opacos reflejan todas las radiaciones.

Reflexión y refracción de la luz

24 Cuando una luz que se propaga por el aire atraviesa un vidrio, disminuye su velocidad. Cuando haya atravesado el vidrio, ¿se moverá con la velocidad que adquirió en él?

La velocidad de la luz en un medio determinado depende del índice de refracción de este y no del lugar del que procede o de los medios que haya atravesado. En consecuencia, al salir del vidrio volverá a propagarse con la velocidad correspondiente al aire como medio.

25 ¿Cuál es la razón física por la que la velocidad de la luz disminuye al propagarse por un medio material? ¿Crees que esa razón está avalada por los valores del índice de refracción correspondientes a cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos?

En un medio transparente, la luz es absorbida por los átomos, para inmediatamente ser reemitida. Esta luz reemitida es absorbida por los átomos vecinos y vuelve a ser emitida, y así sucesivamente. El tiempo implicado en este proceso explica que la velocidad de transmisión de la luz sea menor al atravesar un medio transparente. Por otra parte, la velocidad de la luz en el medio interatómico es la correspondiente al vacío. Por este motivo, la velocidad de propagación es mayor, en general, cuanto mayor sea la distancia interatómica, como es el caso de los gases frente a los líquidos y los sólidos.

26 En algunos países nórdicos son famosas las leyendas de los «barcos que navegan por el aire». ¿Se te ocurre alguna explicación física de esto?

En dichos países es frecuente que las capas de aire que están más próximas al agua se hallen a menor temperatura que las capas que se encuentran algo más altas. En consecuencia, la luz que proviene de los barcos, se refracta en las capas más altas curvando su trayectoria en un fenómeno que aparenta ser una reflexión, para llegar finalmente a un observador que estuviese en la costa. Para este, la luz del barco parecería provenir del aire y no del agua; de ahí, las leyendas de barcos fantasmas.

27 ¿Por qué al conducir de noche con el pavimento mojado se ve la carretera con más dificultad?

Se ve peor la carretera porque se produce mayor reflexión especular sobre el pavimento mojado, de modo que la luz reflejada ya no se dirige hacia nosotros, sino en dirección contraria. Cuando el asfalto está seco, la reflexión difusa hace que parte de la luz reflejada llegue a nuestros ojos, lo que posibilita la visión de la carretera.

28 **PAU** Sobre un prisma de 60° como el de la figura, rodeado de aire ($n = 1$), incide un rayo luminoso monocromático que forma un ángulo de 42° con la normal a la cara AB. Sabiendo que en el interior del prisma el rayo es paralelo a la base AC:

- Determina el índice de refracción del prisma.
- Realiza el esquema gráfico de la trayectoria total del rayo.
- Determina el ángulo de desviación del rayo al atravesar el prisma.
- Razona si varían la frecuencia y la longitud de onda del rayo dentro y fuera del prisma.

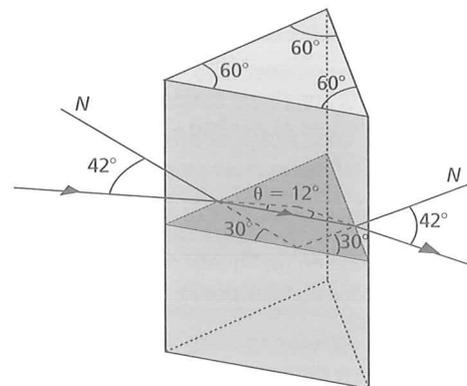
a) Dada la geometría del problema el haz refractado forma un ángulo de 30° con la normal. Considerando $n_{\text{aire}} = 1$, se tiene:

$$n_{\text{aire}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{prisma}} \cdot \sin \hat{r}$$

Por tanto:

$$n_{\text{prisma}} = n_{\text{aire}} \cdot \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = 1,34$$

b) El esquema gráfico que representa la trayectoria del rayo es:



c) El ángulo δ de desviación, es la diferencia angular entre el rayo de entrada (incidente) y el de salida. Como se desprende de la geometría del problema:

$$\delta = 2\theta = 24^\circ$$

d) La frecuencia es invariable, pues según incide un frente de onda sale otro refractado.

Sin embargo, el cambio de velocidad supone un cambio de la longitud de onda en el interior del prisma, de modo que:

$$\lambda_{\text{prisma}} = \lambda_{\text{aire}} \cdot \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{prisma}}} \cong 0,75 \cdot \lambda_{\text{aire}}$$

29 **PAU** Un rayo láser de 660 nm emite en el aire una luz roja monocromática. Desde el aire, se hace penetrar el haz en el agua ($n = 1,333$).

- ¿Cuál es la velocidad del haz en el agua?
- ¿Cuál es su longitud de onda en este medio?
- ¿De qué color lo verá una persona que esté dentro del agua?

a) De la definición del índice de refracción se obtiene:

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

b) Al pasar del aire (consideremos $n_1 = 1$) al agua, se cumplirá que:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Como $v = \lambda f$, y f no varía, obtenemos:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

De donde:

$$\lambda_2 = \frac{n_1 \lambda_1}{n_2} = \frac{1 \cdot 660 \text{ nm}}{1,333} = 495 \text{ nm}$$

c) La frecuencia de la luz no varía al penetrar en otro medio por el que puede transmitirse, por lo que se seguirá viendo rojo.

Comentario: al considerar medios transparentes, no tenemos en cuenta la absorción del agua para frecuencias próximas al infrarrojo, lo que hace que absorba débilmente el rojo. Este fenómeno, sin embargo, solo es apreciable a grandes profundidades.

D30 PPAU Un rayo de luz incide en un prisma como se indica en la figura. Si deseamos que se produzca la reflexión total:

- ¿Cuál debe ser el mínimo valor que puede tener n' ?
- Cuando se sumerge el prisma en un líquido de $n' = 1,20$ aún se produce la reflexión total, pero deja de producirse al sumergirse en agua ($n_{\text{agua}} = 1,33$). Con esta información, determina entre qué valores está el valor real del índice de refracción del prisma.
- El mismo valor para el que se produce reflexión total interna viene dado por la condición:

$$n_{\text{prisma}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ$$

Dado que el ángulo de incidencia sobre la cara inclinada es 45° , entonces el mínimo valor del índice de refracción del prisma es:

$$n_{\text{prisma}} = n_{\text{aire}} \cdot \frac{1}{\sin \hat{i}} = 1,41$$

- Al sumergirlo en un líquido de $n' = 1,20$, aún se produce reflexión total interna, por lo que el mínimo valor de n_p en ese caso es:

$$n_{\text{prisma}} = n' \cdot \frac{1}{\sin \hat{i}} = \frac{1,2}{\sin 45^\circ} = 1,69$$

Sin embargo, deja de haber reflexión total interna cuando se sumerge en agua, por lo que el valor límite del índice del prisma es:

$$n_{\text{prisma}} = n_{\text{aire}} \cdot \frac{1}{\sin 45^\circ} = \frac{1,33}{\sin 45^\circ} = 1,88$$

Por tanto, el índice real se encuentra comprendido entre 1,69 y 1,88.

B1 PPAU Una lámina de cuarzo de caras planas y paralelas de 10 cm de espesor, tiene un índice de refracción de 1,458. Si un rayo de luz monocromática incide sobre una de las caras con un ángulo de 60° , calcula:

- Los valores del ángulo de refracción en el interior de la lámina y el ángulo de emergencia al volver a salir al aire por la otra cara.
- El desplazamiento lateral experimentado por dicho rayo al atravesar la lámina.
- Dibuja correctamente la marcha geométrica del rayo, especificando todos los fenómenos que tienen lugar en cada interfase de separación de los medios.
- El ángulo de refracción viene dado por la ley de Snell, de modo que:

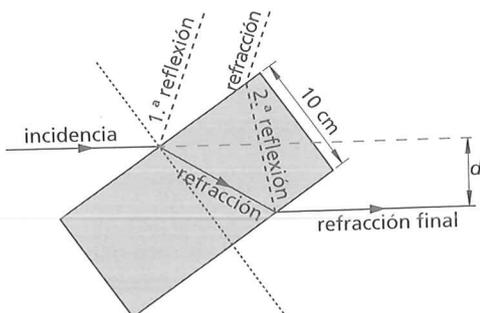
$$n_{\text{prisma}} \cdot \sin \hat{i} = n_{\text{cuarzo}} \cdot \sin \hat{r} \Rightarrow \hat{r} = 36,4^\circ$$

Por la simetría del problema, el ángulo de emergencia es igual al de incidencia, es decir 60° .

- El desplazamiento lateral del haz es:

$$d = e \frac{\sin(\hat{i} - \hat{r})}{\cos \hat{r}} = 10 \frac{\sin 23,6^\circ}{\cos 36,4^\circ} = 4,97 \text{ cm}$$

- La marcha geométrica del rayo está representado en el siguiente dibujo:



B2 PPAU Un haz monocromático incide con cierto ángulo sobre una lámina de material transparente de caras planas y paralelas de 15 cm de espesor. Se observa que el ángulo de refracción del haz en el interior del material es de 30° y que al salir de él muestra un desplazamiento de 8 cm. Determina:

- ¿Cuál era el ángulo de incidencia del haz?
 - ¿Cuál es el índice de refracción del material relativo al aire (medio de incidencia)?
- a) A partir de la expresión del desplazamiento se obtiene:

$$\sin(\hat{i} - \hat{r}) = \frac{d \cos \hat{r}}{e} = \frac{8 \cos 30^\circ}{15} = 0,46$$

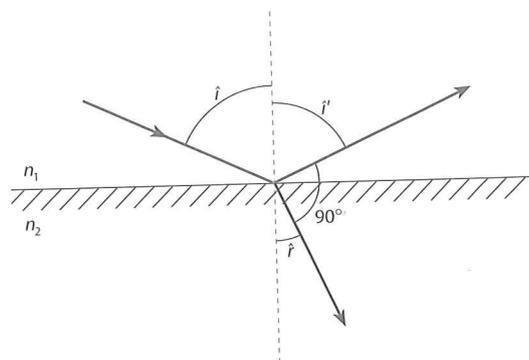
$$\text{Por tanto: } \hat{i} - \hat{r} = 27,5 \Rightarrow \hat{i} = 57,5^\circ$$

- Por aplicación de la ley de Snell:

$$n = \frac{n_{\text{aire}} \cdot \sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = 1,68$$

B3 PPAU Un rayo luminoso llega a la interfase de dos medios con un ángulo de incidencia \hat{i} . Si los rayos reflejado y refractado forman entre sí 90° , halla la relación que existe entre el ángulo de incidencia y el índice de refracción relativo de los dos medios.

La siguiente figura ilustra el enunciado del problema, donde \hat{i} es el ángulo de incidencia, \hat{i}' es el de reflexión, y \hat{r} el de refracción:



Si aplicamos la ley de Snell:

$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r}$$

donde $\hat{r} = 180^\circ - (90^\circ + \hat{i}')$

Puesto que $\hat{i}' = \hat{i}$, entonces:

$$\hat{r} = 90^\circ - \hat{i}$$

Por lo que:

$$\sin \hat{r} = \sin(90^\circ - \hat{i}) = \cos \hat{i}$$

Así pues:

$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \cos \hat{i}$$

de donde:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \hat{i}}{\cos \hat{i}} = \text{tg } \hat{i}$$

o bien:

$$n_{21} = \text{tg } \hat{i}$$

B4 Dibuja la trayectoria exacta de todos los rayos que se forman en la experiencia de la figura del ejercicio 34 página 287 (especificando cómo salen) e indica los valores de los ángulos que intervengan, así como los puntos exactos donde los rayos entran en contacto con las superficies.

El haz es de luz amarilla de sodio e incide con un ángulo de 45° en un punto que se encuentra situado a 2,5 cm de la superficie inferior. La altura de cada bloque es de 5 cm, y el medio que los rodea es aire. (Considera que el valor del índice de refracción del aire es 1 y desprecia el efecto de la interfase de cristal que contiene el agua.)

Los fenómenos que tendrán lugar son la reflexión y la refracción al cambiar de medio.

Cuando el haz incidente entra en el vidrio, sufrirá una refracción bajo un ángulo dado por:

$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{r} \Rightarrow \sin \hat{r} = \frac{1 \cdot \sin 45^\circ}{1,46}$$

Y por tanto:

$$\hat{r} = 28,96^\circ$$

A continuación, este haz refractado llega a la cara inferior del bloque de vidrio a una distancia que, como puede verse en la figura que aparece al final, será de:

$$\operatorname{tg} \hat{r} = \frac{2,5}{x_1} \Rightarrow x_1 = 4,5 \text{ cm}$$

Al llegar a la cara inferior con un ángulo de incidencia de $90^\circ - 28,96^\circ = 61,04^\circ$, sufrirá una reflexión total interna, pues este ángulo es superior al ángulo crítico correspondiente a la interfase vidrio-aire, que es de:

$$\sin \hat{r}_c = \frac{1}{1,46} \Rightarrow \hat{r}_c = 43,23^\circ$$

Este rayo reflejado llegará ahora a la interfase vidrio-agua en el punto B, a una distancia horizontal de 9 cm con respecto al punto A. Parte del haz que incide (con un ángulo de $61,04^\circ$) se reflejará y parte se refractará.

El ángulo de refracción al pasar al agua será:

$$\sin \hat{r}' = \frac{n_v}{n_a} \sin \hat{i}$$

Y sustituyendo los datos:

$$\sin \hat{r}' = \frac{1,46}{1,333} \cdot \sin 61,04^\circ \Rightarrow \hat{r}' = 73,4^\circ$$

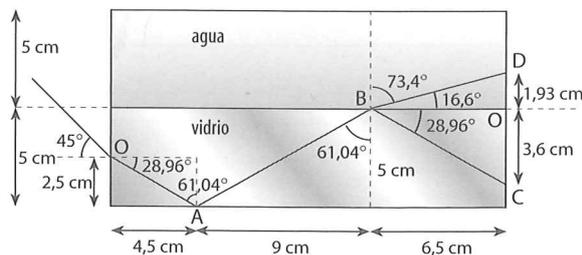
Así pues, al final ambos emergerán del bloque por los puntos C y D, situados a 3,6 cm por debajo de la interfase vidrio-agua y a 1,93 cm por encima, respectivamente, pues, como se deduce de la figura:

$$\operatorname{tg} (90^\circ - 73,4^\circ) = \frac{OD}{6,5 \text{ cm}} \Rightarrow OD = 1,93 \text{ cm}$$

Mientras que:

$$\operatorname{tg} 28,96^\circ = \frac{OC}{6,5 \text{ cm}} \Rightarrow OC = 3,6 \text{ cm}$$

Así pues, el sistema sirve como divisor del haz.



- 35** Un haz de luz monocromática de sodio, de 589 nm, incide con un ángulo de 45° sobre una lámina de caras planas y paralelas de circonita ($n = 1,92$) de 10 cm de espesor. Calcula el desplazamiento lateral que ha sufrido el haz cuando sale.

El ángulo de refracción en la circonita será:

$$\sin \hat{r} = \frac{n_1 \sin \hat{i}}{n_2} = \frac{1 \cdot \sin 45^\circ}{1,92} \Rightarrow \hat{r} = 21,57^\circ$$

El desplazamiento lateral que sufre al atravesar una lámina de espesor e viene dado por:

$$d = e \frac{\sin (\hat{i} - \hat{r})}{\cos \hat{r}} = 4,27 \text{ cm}$$

- D36 IPAU** Un haz de luz láser de 550 nm incide en un bloque de vidrio:

- Describe los fenómenos ópticos que ocurren y represéntalos fielmente en un dibujo.
- Si el ángulo de incidencia es de 40° y el de refracción es de 25° , ¿cuál es el índice de refracción del vidrio?
- ¿Sería diferente el valor anterior si la longitud de onda fuese de 710 nm?
- Razona cómo calcularías el ángulo límite y ofrece su valor a partir de los datos del apartado b).

En todos los casos considera aproximadamente 1 el valor del índice de refracción en el aire.

- Parte del haz incidente se refleja, y otra parte pasa a propagarse por el vidrio, es decir, se refracta.
- Considerando $n_1 = 1$ (para el aire), el índice de refracción del vidrio será:

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{1 \cdot \sin 40^\circ}{\sin 25^\circ} = 1,52$$

- El valor calculado es para luz amarilla (550 nm). El valor deducido sería ligeramente distinto si se hubiese calculado para luz roja (710 nm), pues el vidrio es un medio dispersivo, por lo que el índice de refracción depende ligeramente de λ . Sin embargo, el valor obtenido afectaría tan solo a la segunda cifra decimal considerada, como puede observarse en la gráfica de la página 277. Podemos suponer, pues, que apenas variará.
- El ángulo límite o crítico será aquel que corresponde a una incidencia rasante ($\sin \hat{i} = 1$, puesto que $\hat{i} = 90^\circ$). De este modo:

$$\sin \hat{r}_c = \frac{1}{n_2} \Rightarrow \hat{r}_c = 41,1^\circ$$

Interferencia y difracción de la luz

- 37** ¿Se te ocurre algún procedimiento para medir el ancho de una rendija submilimétrica? Explica el procedimiento y la forma de llevarlo a cabo.

Habría que situar la rendija a cierta distancia de una pantalla y producir un patrón de difracción con un láser de longitud de onda conocida. De esa manera, conociendo la longitud de onda y la distancia entre la rendija y la pantalla, y midiendo la mitad del ancho del máximo principal, podemos averiguar la anchura de la rendija, utilizando la expresión 10.10 del texto.

- 38** ¿Podrían interferir dos haces de luz polarizada, de la misma frecuencia y con diferencia de fase constante, si el plano de polarización entre ambos es perpendicular?

No podrían interferir. La condición de coherencia exige que, si la luz es polarizada, el plano de polarización sea el mismo.

- 39** Si aproximas, hasta casi juntarlos, los dedos índice y corazón y miras hacia alguna luz a través de ellos, verás que los bordean ciertas líneas oscuras. ¿A qué se debe esto?

Se debe al patrón de difracción que se origina en la ranura que forman los dos dedos casi juntos.

- 40 IPAU** En un experimento como el de Young se hace incidir sobre dos rendijas luz amarilla de sodio de 589 nm. En una pantalla que está situada a 3 m de las rendijas se cuentan 30 franjas brillantes por centímetro. ¿Cuál es la separación entre las rendijas?

Puesto que hay 30 máximos en cada centímetro, la distancia entre máximos será:

$$\Delta y = \frac{1}{30} = 0,033 \text{ cm} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Según el experimento de Young la distancia entre máximos viene dada por:

$$\Delta y = \frac{d}{a} \lambda$$

donde d es la distancia entre pantallas, y a es la distancia o separación entre rendijas. De este modo:

$$a = \frac{d\lambda}{\Delta y} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

- 41 PAU** Se efectúa el experimento de Young iluminando con luz amarilla de sodio de 589 nm dos rendijas separadas una de la otra 2 mm. Si la pantalla en la que se observa el patrón de interferencias está a 5 m, ¿cuál es la separación que se observará entre las franjas?

La separación entre las franjas será de:

$$\Delta y = \frac{d}{a} \lambda = \frac{5 \text{ m}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \cdot 5,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Es decir:

$$\Delta y = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Luego, la separación entre máximos es de 1,47 mm.

- 42 PAU** Sobre una pantalla que se encuentra situada a 3,5 m de una rendija se observa el patrón de difracción de un haz de 650 nm. Calcula la anchura del máximo central si la de la rendija es:

- a) 0,1 mm b) 0,01 mm c) 0,001 mm

La anchura de la banda central es el doble que la distancia del centro del patrón al primer mínimo, por lo que vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\text{anchura de la banda} = \frac{2d}{a} \lambda$$

Así pues, según las anchuras de las rendijas, las de los máximos centrales serán:

- a) Para la rendija de 0,1 mm:
anchura máxima = 0,046 m
- b) Para la rendija de 0,01 mm:
anchura máxima = 0,46 m
- c) Para la rendija de 0,001 mm:
anchura máxima = 4,6 m

Interacción luz-materia

- 43** ¿Por qué los diamantes y otras piedras preciosas talladas con varias caras presentan un brillo extraordinario así como esos bellos centelleos o irisaciones tan característicos?

La razón es que precisamente por el elevado índice de refracción del diamante, la reflexión total interna en las distintas caras talladas se ve favorecida, lo que hace que presenten ese brillo de reflejos tan peculiar y característico.

Además, como el índice de refracción depende ligeramente de la frecuencia, la luz blanca se descompone en el interior del cristal, lo que da lugar a esas irisaciones tan característica.

- 44** ¿Podemos broncearnos en días nublados? ¿Y tomando el sol a través de una ventana de cristal?

Las nubes son, en realidad, semitransparentes a la radiación ultravioleta, por lo que, en efecto, podemos broncearnos algo en días nublados.

Por el contrario, sería una pérdida de tiempo pretender broncearse a través de una ventana de cristal, pues el vidrio es opaco a la radiación ultravioleta.

- 45** Explica por qué en los eclipses de Luna esta aparece sombreada con un tono rojizo a diferencia del eclipse que tuvo lugar inmediatamente después de la explosión del volcán Pinatubo (Filipinas), en el que la sombra era prácticamente negra.

La componente de la luz que sufre menos esparcimiento Rayleigh es la roja, que es la que logra, por tanto, propagarse y atravesar grandes extensiones atmosféricas. Durante un eclipse de Luna, la sombra de la Tierra se proyecta sobre nuestro satélite; sin embargo, parte de la luz solar atraviesa nuestra atmósfera, aunque de ella solo trasciende la componente roja que menos se esparce y que finalmente se proyecta sobre la Luna, dando lugar a esa típica coloración rojiza.

Sin embargo, los eclipses de Luna que sucedieron después de la explosión del Pinatubo fueron especialmente oscuros por la gran cantidad de polvo en suspensión que quedó en la atmósfera y que produjo, debido al tamaño de las partículas en suspensión, un esparcimiento de tipo no Rayleigh. Esto provocó un esparcimiento similar en cualquier frecuencia, incluidas las correspondientes a la componente rojiza de la luz.