



ÓPTICA FÍSICA – FÍSICA 2ºBACH



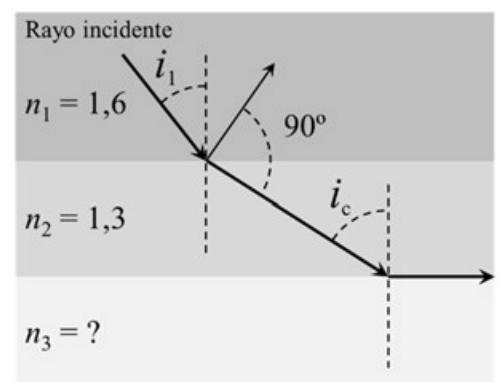
Teoría: Define

- Explica los conceptos de **índice de refracción** de la luz, **velocidad de propagación de la luz, frecuencia y longitud de onda**, indicando las principales características y relaciones entre estos conceptos. Ayúdate de las fórmulas correspondientes.
- ¿Qué es el **espectro electromagnético**? ¿A qué llamamos el espectro visible o luz visible?, ¿entre que longitudes de onda se encuentra el espectro visible?
- Describe detalladamente los conceptos de **reflexión y refracción de la luz**. Enuncia las **leyes de Snell**, haciendo especial hincapié en la fórmula que se utiliza para estudiar la refracción de la luz. Utiliza el diagrama correspondiente para ilustrar estos conceptos.
- Explica el fenómeno de **reflexión total** y el concepto de **ángulo límite**, indicando las condiciones necesarias para que se pueda producir. Ayúdate del diagrama correspondiente.
- Describe el fenómeno de dispersión de la luz, indica cómo se puede producir.



Ejemplo resuelto 1: 2019-Junio 4B

Un rayo de luz se propaga según muestra el esquema de la figura. Primero incide con un ángulo i_1 desde un medio de índice de refracción $n_1 = 1,6$ sobre un medio de índice de refracción $n_2 = 1,3$ de manera que el rayo reflejado y el rayo refractado forman entre si un ángulo de 90° . El rayo refractado incide con el ángulo crítico i_c sobre otro medio de índice de refracción n_3 desconocido. Determine:



- a) Los ángulos de incidencia i_1 e i_c .
- b) El índice de refracción n_3 .

Solución:



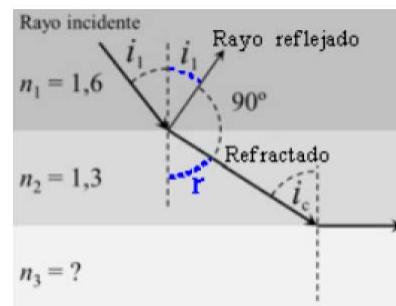


a) En primer lugar, se aplica la ley de Snell atendiendo a la refracción entre los medios 1 y 2, quedando:

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin r \Rightarrow \\ \Rightarrow 1,6 \cdot \sin i_1 = 1,3 \cdot \sin r$$

Atendiendo al diagrama dado, se puede observar que el ángulo de incidencia i_1 y el ángulo de refracción r son ángulos complementarios, es decir ambos suman 90° . De esta forma, por trigonometría podemos establecer que una relación entre r e i_1 , de la siguiente forma:

$$i_1 + r = 90^\circ \Rightarrow r = 90^\circ - i_1$$



Y así podemos expresar la ley de Snell solamente en función de i_1 :

$$1,6 \cdot \sin i_1 = 1,3 \cdot \sin(90^\circ - i_1)$$

Por trigonometría:

$$\sin(90^\circ - i_1) = \cos i_1$$

Quedando entonces:

$$1,6 \cdot \sin i_1 = 1,3 \cdot \cos i_1 \Rightarrow \\ \frac{\sin i_1}{\cos i_1} = \frac{1,3}{1,6} \Rightarrow \tan i_1 = 0,8125 \Rightarrow i_1 = \arctan 0,8125 \Rightarrow i_1 = 39,09^\circ$$

Para calcular i_c , debe observarse que i_c es igual al ángulo r anterior, al transmitirse el rayo entre dos caras paralelas, el ángulo de incidencia del medio 2 al medio 3 es el mismo que el ángulo de refracción del medio 1 al medio 2.

Se calcula entonces r e i_c , atendiendo a la relación anteriormente descrita de r con i_1 :

$$i_1 + r = 90^\circ \Rightarrow r = 90^\circ - i_1 \Rightarrow r = 90^\circ - 39,09^\circ \Rightarrow r = 50,91^\circ \\ \text{Como } i_c = r \Rightarrow i_c = 50,91^\circ$$





- b) Para calcular n_3 , se aplica la ley de Snell atendiendo a la refracción entre los medios 2 y 3, pero en este caso al ser i_c un **ángulo crítico** (o también llamado ángulo límite) no habrá refracción (el ángulo r será 90°) y por lo tanto a partir de ese ángulo i_c se producirá la reflexión total de todo el rayo, sin pasar al medio 3. Queda entonces:

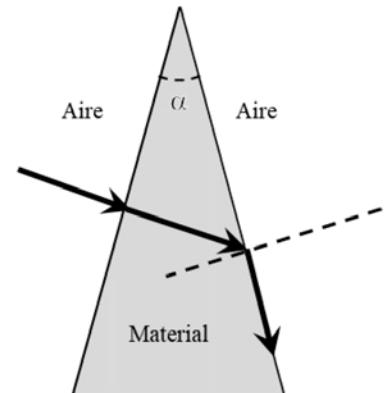
$$n_2 \cdot \sin i_c = n_3 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow \\ 1,3 \cdot \sin 50,91^\circ = n_3 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow n_3 = 1$$

Nota: Es importante tener en cuenta que para que pueda haber ángulo límite es necesario que la luz pase de un medio más refringente (mayor índice de refracción) a un medio menos refringente (menor índice de refracción). Puede comprobarse que es lo que sucede en el caso anterior.



Ejemplo resuelto 2: 2018-Julio 4B

Un material transparente de índice de refracción $n = 2$ se encuentra situado en el aire y limitado por dos superficies planas no paralelas que forman un ángulo α . Sabiendo que el rayo de luz monocromática que incide perpendicularmente sobre la primera superficie emerge por la segunda con un ángulo de 90° con respecto a la normal, como se muestra en la figura, determine:



- El valor del ángulo límite para la incidencia material-aire y el valor del ángulo α .
- El ángulo de incidencia de un rayo en la primera superficie para que el ángulo de emergencia por la segunda sea igual que él.

Dato: Índice de refracción del aire, $n_{aire} = 1$.

Solución:

Solución:

- Primeramente, se tiene que el rayo de luz pasa del aire al material de manera perpendicular en la primera cara, por lo que se atenderá directamente al paso del rayo desde el material al aire por la segunda cara. Como el enunciado indica que el rayo emerge a través de la segunda cara, significa que dicho rayo no llega a pasar al aire,





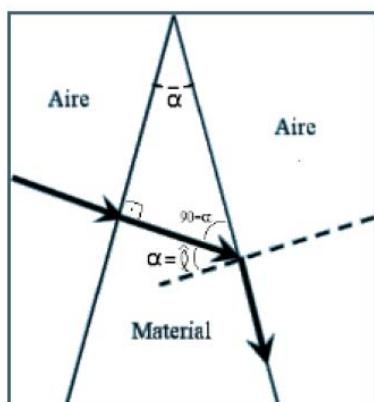
no se produce refracción, se trata de un ángulo de incidencia crítico, o ángulo límite.

Se aplica entonces la ley de Snell atendiendo a la refracción entre los medios “Material” y “Aire”, considerando que el ángulo de incidencia es límite:

$$\begin{aligned} n_{\text{material}} \cdot \sin \ell &= n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow 2 \cdot \sin \ell &= 1 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow \sin \ell = \frac{1}{2} \Rightarrow \ell = \arcsen 0,5 = 30^\circ \end{aligned}$$

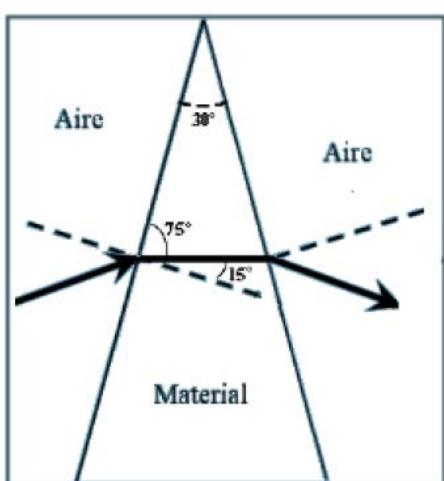
El ángulo alfa, será igual al ángulo límite, esto se puede ver de manera geométrica (ver diagrama):

$$\alpha = \ell = 30^\circ$$



Nota: Existen diferentes formas de explicar esto: una sencilla forma de verlo es que cuando se trazan perpendiculares a los dos lados de un ángulo, al cruzarse dichas perpendiculares se obtiene nuevamente dicho ángulo (girado 90°). Esto sucede al trazar las dos rectas normales a las caras de un prisma.

- b) Para que el ángulo de incidencia en la primera cara del prisma sea igual que el ángulo de refracción de la segunda cara (ángulo de emergencia), el rayo debe moverse paralelo a la base en el interior del prisma, siempre que se trate del mismo medio alrededor de las dos caras del prisma.**



Lo anteriormente comentado se explica aplicando la ley de Snell a las dos caras del material:

$$\begin{aligned} \text{Cara 1: } n_{\text{aire}} \cdot \sin i_1 &= n_{\text{material}} \cdot \sin r_1 \\ \text{Cara 2: } n_{\text{material}} \cdot \sin i_2 &= n_{\text{aire}} \cdot \sin r_2 \\ \text{Si } i_1 = r_2 \Rightarrow \\ \frac{n_{\text{material}} \cdot \sin r_1}{n_{\text{aire}}} &= \frac{n_{\text{material}} \cdot \sin i_2}{n_{\text{aire}}} \Rightarrow r_1 \\ &= i_2 \end{aligned}$$

Para que esto se cumpla el rayo debe formar un triángulo isósceles dentro del prisma, es decir ir paralelo a la base.





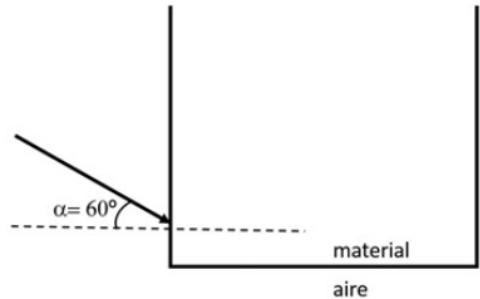
Entonces, conocido el ángulo del prisma (α) del apartado anterior, se forma un triángulo isósceles de ángulos: 30° , 75° y 75° . A partir de este triángulo se deduce el ángulo de refracción de la primera cara (aire-material), quedando $r_1 = 15^\circ$. Y por último, aplicando la ley de Snell se obtiene el ángulo de incidencia en la primera cara que cumple las condiciones descritas:

$$\begin{aligned} & \text{Se tiene } r_1 = 15^\circ \\ & n_{\text{aire}} \cdot \sin i_1 = n_{\text{material}} \cdot \sin r_1 \Rightarrow \\ & 1 \cdot \sin i_1 = 2 \cdot \sin 15^\circ \Rightarrow \sin i_1 = 0,5176 \Rightarrow i_1 = \arcsen 0,5176 \Rightarrow \\ & \Rightarrow i_1 = 31,17^\circ \end{aligned}$$



Ejemplo resuelto 3: 2017-Junio 4B

Sobre un bloque de material cuyo índice de refracción depende de la longitud de onda, incide desde el aire un haz de luz compuesto por longitudes de onda de 400 nm (violeta) y 750 nm (rojo). Los índices de refracción del material para estas longitudes de onda son 1,66 y 1,60, respectivamente. Si, como se muestra en la figura, el ángulo de incidencia es de 60° :



- ¿Cuáles son los ángulos de refracción y las longitudes de onda en el material?
- Determine el ángulo límite para cada longitud de onda en la frontera entre el material y el aire. Para $\alpha = 60^\circ$, ¿escapan los rayos desde el medio hacia el aire por la frontera inferior?

Dato: Índice de refracción del aire, $n_{\text{aire}} = 1$.

Solución:

Debe tenerse en cuenta que las diferentes longitudes de onda que componen el espectro electromagnético no se mueven a la misma velocidad en los diferentes medios (excepto en el vacío), esto explica que, al atravesar un material, cada longitud de onda se vea modificada.

- En primer lugar, se calcula el ángulo de refracción de cada uno de los rayos aplicando la ley de Snell:





$$\begin{aligned} \text{Luz violeta (400 nm): } & n_{\text{aire}} \cdot \sin i_1 = n_{2-\text{violeta}} \cdot \sin r_{\text{violeta}} \Rightarrow \\ & \Rightarrow 1 \cdot \sin 60^\circ = 1,66 \cdot \sin r_{\text{violeta}} \Rightarrow \sin r_{\text{violeta}} = 0,5217 \Rightarrow \\ & \Rightarrow r_{\text{violeta}} = 31,44^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luz roja (750 nm): } & n_{\text{aire}} \cdot \sin i_1 = n_{2-\text{rojo}} \cdot \sin r_{\text{rojo}} \Rightarrow \\ & \Rightarrow 1 \cdot \sin 60^\circ = 1,60 \cdot \sin r_{\text{rojo}} \Rightarrow \sin r_{\text{rojo}} = 0,5412 \Rightarrow \\ & \Rightarrow r_{\text{rojo}} = 32,76^\circ \end{aligned}$$

En segundo lugar, **cada rayo, al atravesar el material ve modificada su longitud de onda**, debido a que la velocidad de la luz en el material es distinta, y la velocidad de propagación de la luz depende de la frecuencia de la luz y de la longitud de onda. **La frecuencia no se modifica al cambiar de medio**, pero sí lo hace la longitud de onda:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$$

Teniendo en cuenta que la longitud de onda en el vacío λ_0 es prácticamente igual a la longitud de onda en el aire (por tener el aire un índice de refracción de 1), **combinando la fórmula anterior con la de índice de refracción se obtiene la nueva longitud de onda para cada rayo dentro del medio**:

$$\begin{aligned} \text{Índice de refracción: } & n = \frac{c}{v} \\ \text{También: } & n = \frac{c}{v_{\text{material}}} = \frac{\lambda_0 \cdot f}{\lambda_{\text{material}} \cdot f} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{material}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luz violeta (400 nm): } & n_{2-\text{violeta}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{2-\text{violeta}}} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \lambda_{2-\text{violeta}} = \frac{400 \cdot 10^{-9}}{1,66} \Rightarrow \lambda_{2-\text{violeta}} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 240 \text{ nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luz roja (750 nm): } & n_{2-\text{rojo}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{2-\text{rojo}}} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \lambda_{2-\text{rojo}} = \frac{750 \cdot 10^{-9}}{1,60} \Rightarrow \lambda_{2-\text{rojo}} = 4,68 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 468 \text{ nm} \end{aligned}$$

- b)** El ángulo límite es el ángulo de incidencia al que corresponde un ángulo de refracción de 90° . **Si el ángulo de incidencia es mayor o igual al ángulo límite, se produce el fenómeno de reflexión total, no produciéndose el cambio de medio del rayo.** **Para calcular el ángulo límite de cada rayo entre el material y el aire, se aplica la ley de Snell, considerando $r = 90^\circ$:**



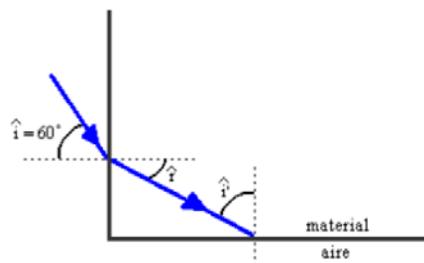


$$n_{\text{material}} \cdot \sin i = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \text{Luz violeta (400 nm): } & n_{2-\text{violeta}} \cdot \sin \ell_v = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow & 1,66 \cdot \sin \ell_v = 1 \Rightarrow \sin \ell_v = 0,6024 \Rightarrow \ell_v = \arcsin 0,6024 \Rightarrow \ell_v = 37,04^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luz roja (750 nm): } & n_{2-\text{roja}} \cdot \sin \ell_r = n_{\text{aire}} \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow & 1,60 \cdot \sin \ell_r = 1 \Rightarrow \sin \ell_r = 0,625 \Rightarrow \ell_r = \arcsin 0,625 \Rightarrow \ell_r = 38,68^\circ \end{aligned}$$

Para saber si con un ángulo de incidencia $\alpha = 60^\circ$ en la primera cara, escaparían los rayos desde el interior del material hacia el aire por la cara inferior, se debe averiguar qué ángulo de incidencia en la cara inferior provocaría ese primer ángulo de incidencia $\alpha = 60^\circ$. Si dicho ángulo de incidencia i_2 es mayor o igual al ángulo límite, entonces el rayo no saldrá por la cara inferior.



Esto ha de hacerse por separado, para cada uno de los rayos. Atendiendo al diagrama, se observa que el ángulo de refracción de la primera cara (aire-material) es complementario con el ángulo de incidencia i_2 (material-aire), de tal forma que podemos calcular dichos ángulos aplicando la ley de Snell a la primera cara (aire-material) y operando:

Considerando $r + i_2 = 90^\circ$, por ser ángulos complementarios, y tomando los distintos ángulos de refracción de cada rayo, ya calculados en el apartado anterior, se tiene entonces:

$$r + i_2 = 90^\circ \Rightarrow i_2 = 90^\circ - r$$

$$\begin{aligned} \text{Luz violeta (400 nm): } & i_{2-\text{violeta}} = 90^\circ - r_{\text{violeta}} = 90^\circ - 31,44^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow & i_{2-\text{violeta}} = 58,56^\circ > 37,04^\circ \Rightarrow i_{2-\text{violeta}} > \ell_v \Rightarrow \text{No hay refracción.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luz roja (750 nm): } & i_{2-\text{rojo}} = 90^\circ - r_{\text{rojo}} = 90^\circ - 32,76^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow & i_{2-\text{rojo}} = 57,24^\circ > 38,68^\circ \Rightarrow i_{2-\text{rojo}} > \ell_r \Rightarrow \text{No hay refracción.} \end{aligned}$$





Tanto para el rayo violeta como para el rojo, si el ángulo de incidencia en la primera cara es igual a 60° , **se produce un ángulo de incidencia en la cara inferior superior al ángulo límite** de cada uno de los rayos, **por lo que ninguno de los rayos se refracta y se produce reflexión total**.



Problema 1: 2016-Modelo 4B

Un foco luminoso puntual está situado en el fondo de un recipiente lleno de agua cubierta por una capa de aceite. Determine:

- El valor del ángulo límite entre los medios aceite y aire.
- El valor del ángulo mínimo, con respecto a la normal al fondo del recipiente, de un rayo de luz procedente del foco luminoso para que se produzca el fenómeno de la reflexión total en la superficie de separación entre el aceite y el aire.

Datos: Índices de refracción: $n_{\text{aire}} = 1$, $n_{\text{agua}} = 1,33$, $n_{\text{aceite}} = 1,48$.

Solución:

- $\ell = 42,5^\circ$
- $\alpha = 48,7^\circ$



Problema 2: 2020-Modelo-4B

Un rayo de luz monocromático que se propaga por el medio 1 de índice de refracción $n_1 = 1,6$ con una longitud de onda 460 nm , incide sobre la superficie de separación con el medio 2 de índice de refracción $n_2 = 1,4$.

$n_1 = 1,6$	medio 1
$n_2 = 1,4$	medio 2
$n_3 = 1,2$	medio 3

- Calcule la frecuencia y la longitud de onda de la luz cuando se propaga en el segundo medio.
- Tras este segundo medio, la luz llega a un tercer medio de índice de refracción $n_3 = 1,2$ (ver figura). Determine el menor ángulo de incidencia del rayo en la superficie de separación entre los medios 1 y 2, para que, al llegar a la superficie de separación entre los medios 2 y 3, se inicie el fenómeno de la reflexión total. Explique en qué consiste este fenómeno.

Dato: Velocidad de luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

Solución:





- a) $f = 4,076 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$; $\lambda = 525,7 \text{ nm}$.
- b) $\hat{i} = 48,6^\circ$; Explicación teórica de ángulo límite.



Problema 3: 2016-Septiembre 4B

Dos rayos que parten del mismo punto inciden sobre la superficie de un lago con ángulos de incidencia de 30° y 45° , respectivamente.

- a) Determine los ángulos de refracción de los rayos sabiendo que el índice de refracción del agua es 1,33.
- b) Si la distancia entre los puntos de incidencia de los rayos sobre la superficie del lago es de 3 m, determine la separación entre los rayos a 2 m de profundidad.

Dato: Índice de refracción del aire, $n_{\text{aire}} = 1$.

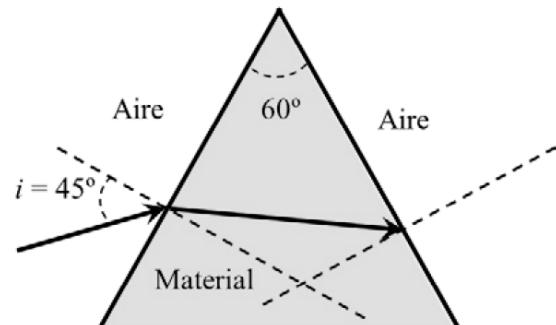
Solución:

- a) $\hat{r}_1 = 22,08^\circ$; $\hat{r}_2 = 32,12^\circ$
- b) 3,44 m.



Problema 4: 2018-Modelo 4B

Sobre un material transparente limitado por dos superficies planas que forman un ángulo de 60° incide, desde el aire, un rayo de luz monocromática con un ángulo $i = 45^\circ$, tal y como se muestra en la figura. Si el índice de refracción del material para esa radiación monocromática es 1,5, determine:



- a) Los ángulos de refracción en cada una de las superficies.
- b) El menor valor del ángulo de incidencia en la primera superficie para que el rayo puedaemerger a través de la segunda superficie.

Dato: Índice de refracción del aire, $n_{\text{aire}} = 1$.

Solución:

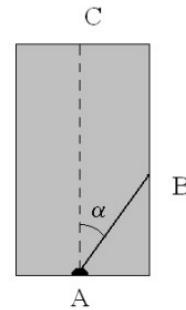
- a) $\hat{r}_1 = 28,1^\circ$; $\hat{r}_2 = 52,4^\circ$
- b) $\hat{i}_1 = 27,9^\circ$





Problema 5: 2013-Septiembre 3B

Se tiene un prisma rectangular de vidrio de índice de refracción 1,48. Del centro de su cara A se emite un rayo que forma un ángulo α con el eje vertical del prisma, como muestra la figura. La anchura del prisma es de 20 cm y la altura de 30 cm.



- Si el medio exterior es aire, ¿cuál es el máximo valor de α para que el rayo no salga por la cara B? Justifique la respuesta.
- Si el medio exterior es agua, ¿cuál es el máximo valor de α para que el rayo no salga por la cara B? Para este valor de α , ¿cuál es el ángulo con el que emerge de la cara C?

Datos: Índice de refracción del aire, $n_{aire}=1$; Índice de refracción del agua, $n_{agua}=1,33$.

Solución:

- $\alpha = 47,5^\circ$
- $\alpha = 26^\circ; \hat{r}_2 = 29,2^\circ$



Problema 6: 2015-Septiembre 4B

Un vidrio de índice de refracción $n = 1,5$ tiene depositada encima una capa de aceite cuyo índice de refracción varía con la longitud de onda según $n = 1,3 + 82/\lambda$ (con λ medida en nm). Al hacer incidir un haz de luz procedente del vidrio sobre la interfase vidrio-aceite, se observa que el ángulo crítico para la reflexión total es de 75° .

- ¿Cuánto vale la longitud de onda de dicha luz?
- ¿Cuál sería el máximo valor de λ para que ocurra la reflexión total si el haz de luz procede del aceite?

Solución:

- $\lambda = 550,7$ nm.
- $\lambda = 410$ nm; Requiere explicación teórica.

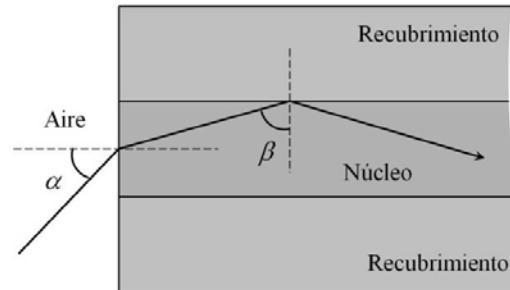




D Problema 7: 2017-Septiembre 4B

Una fibra óptica de vidrio posee un núcleo con un índice de refracción de 1,55, rodeado por un recubrimiento de índice de refracción de 1,45. Determine:

- El ángulo mínimo β que debe tener un rayo que viaja por la fibra óptica a partir del cual se produce reflexión total interna entre el núcleo y el recubrimiento.
- El ángulo máximo de entrada α a la fibra para que un rayo viaje confinado en la región del núcleo.



Dato: Índice de refracción del aire, $n_{aire} = 1$.

Solución:

- $\beta = 69,3^\circ$
- $\alpha = 33,2^\circ$

D Problema 8: 2019-Julio 4B

Desde lo alto de un trampolín, Carlos es capaz de ver a Laura que está buceando en el fondo de la piscina. Para ello tiene que mirar con un ángulo de 30° con respecto a la vertical. La altura de observación es de 4 m y la piscina tiene una profundidad de 3 m. Si el índice de refracción del agua es $n_{agua} = 1,33$, determine:

- La distancia respecto a la vertical del trampolín a la que se encuentra Laura.
- El ángulo límite entre ambos medios y realice un esquema indicando la marcha del rayo.

Dato: Índice de refracción del aire, $n_0 = 1$.

Solución:

- $d = 3,53$ m.
- $\ell = 48,75^\circ$; realizar esquema.





D Problema 9: 2015-Modelo 4B

Una superficie plana separa dos medios transparentes de índices de refracción $n_1 = 2$ y $n_2 = 1,4$ respectivamente. Un rayo luminoso incide desde el medio de índice de refracción $n_1 = 2$ sobre la superficie de separación de los dos medios observándose que el rayo reflejado y el refractado son perpendiculares entre sí. Calcule:

- Los valores de los ángulos de incidencia y de refracción.
- Entre qué valores tiene que estar comprendido el ángulo de incidencia para que se produzca rayo refractado.

Solución:

- $\hat{i} = 35^\circ; \hat{r} = 55^\circ$
- $0^\circ < \hat{i} < 44,4^\circ$

D Problema 10: 2019-Julio-Coincidentes

Un rayo luminoso de frecuencia $f_1 = 6 \cdot 10^{14}$ Hz se propaga desde el aire (índice de refracción $n_1 = 1$) hacia otro medio de índice de refracción n_2 . Se observa que al atravesar la superficie plana de separación el rayo modifica su dirección alejándose de la superficie.

- ¿Será $n_2 > n_1$ o $n_2 < n_1$? Justifique la respuesta. Si el ángulo de refracción es el complementario del de incidencia y este último es de 60° , ¿cuánto vale n_2 ?
- ¿Cuál sería la frecuencia y la longitud de onda del rayo refractado si fuese $n_2 = 1,5$?

Dato: Velocidad de propagación de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹.

Solución:

- $n_2 > n_1$ (requiere demostración con Ley de Snell); $n_2 = 1,73$
- $f = 6 \cdot 10^{14}$ Hz (no cambia); $\lambda = 333$ nm.

