

3. Refracción de la Luz. Prismas.

3.1. Introducción.

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido.

La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal. Para interpretar los fenómenos de reflexión y refracción de la luz, debemos considerar que la luz se propaga en forma de rayos rectilíneos.

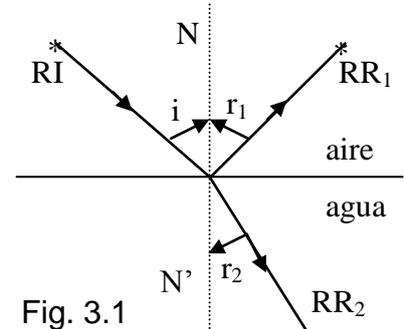


Fig. 3.1

Ejemplo: Cuando la luz atraviesa una superficie plana y lisa que separa dos cuerpos transparentes (el aire y un vidrio, o un vidrio y el agua) el rayo incidente se divide en dos, uno reflejado y otro refractado. (Fig.3.1)

Donde: RI: rayo incidente. RR₂: rayo refractado. RR₁: rayo reflejado. NN': normal.
i: ángulo de incidencia. r₂: ángulo de refracción. r₁: ángulo de reflexión.

Refracción Óptica: Es el fenómeno que ocurre cuando la luz atraviesa la superficie de separación entre dos medios en los cuales se propaga con velocidades diferentes. (Figs. 3.2 y 3.3)

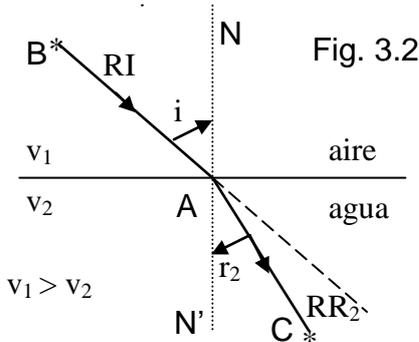


Fig. 3.2

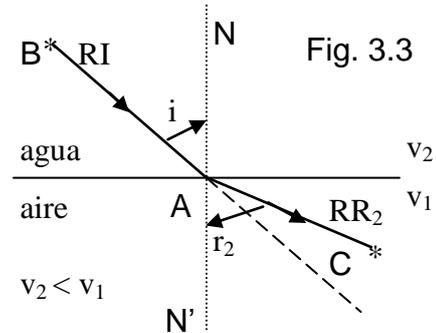


Fig. 3.3

Donde: v₁ y v₂: Velocidad de propagación de la luz.

3.2. ¿Cuáles son las Leyes de la Refracción Óptica?

1. El rayo incidente, el rayo refractado y la normal están en un mismo plano que es perpendicular a la superficie de separación.
2. La relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una cantidad constante (n) denominada índice de refracción relativo del segundo medio respecto al primero.

$$n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.1)$$

Si $n > 1$, $v_1 > v_2$, $i > r$. El rayo refractado se acerca a la normal. Ejemplo: aire → agua

Si $n < 1$, $v_1 < v_2$, $i < r$. El rayo refractado se aleja de la normal. Ejemplo: agua → aire

Algunos índices de refracción: $n_{\text{agua}} = 1,33$; $n_{\text{v-crown}} = 1,52$; $n_{\text{v-flint}} = 1,65$

3.3. ¿En qué consiste el principio de Fermat?

El camino real de la propagación de la luz (el trayecto del haz luminoso) es el que recorre la luz en el tiempo más corto, respecto a los tiempos en que recorrería otros caminos imaginarios entre dichos puntos.

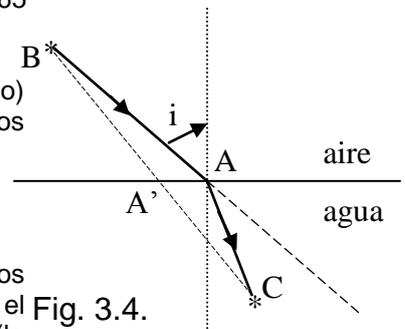


Fig. 3.4.

3.4. ¿Cómo explicar la ley de la refracción utilizando el principio de Fermat?

La imagen de (B) se observa en (C) y el recorrido más corto de los rayos es el que describe la línea discontinua (BA'C) pero los rayos toman el camino (BAC) ya que de esta forma se propaga más rápido la luz, (la velocidad de propagación de la luz en el aire es mayor que en el agua). (Fig. 3.4)

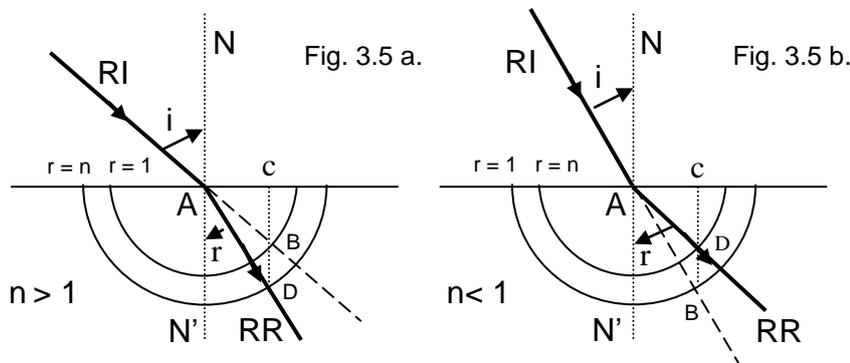
Ejemplo 1: Un rayo luminoso incide en la superficie del agua con un ángulo de incidencia igual a 52° . Calcula el ángulo de refracción. $\text{Sen } 52^\circ = 0,788$; $\text{sen } 36,3^\circ = 0,5924$; $\text{sen } 39^\circ = 0,6293$; $n_{(\text{agua} - \text{aire})} = 1,33$
Datos: $\text{Sen } 52^\circ = 0,788$ $n_{(\text{agua} - \text{aire})} = 1,33$ $\text{sen } 36,3^\circ = 0,5924$
Respuesta: $n = \text{sen } i / \text{sen } r$; $\text{sen } r = \text{sen } i / n = 0,788 / 1,33 = 0,5924$; $r = 36,3^\circ$

3.5. Deducción de las leyes de la refracción de la luz a partir del principio de Huygens.

Las leyes de la refracción de la luz suelen deducirse empleando la teoría ondulatoria de la luz introducida en el siglo XVII por el matemático, astrónomo y físico holandés Christian Huygens. El principio de Huygens afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden. Con ello puede definirse un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias. Como la luz avanza en ángulo recto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz.

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El conjunto reflejado vuelve al primer medio, y el conjunto refractado entra en el segundo medio.

El comportamiento de los rayos refractados puede explicarse por el principio de Huygens.



Si observamos la figura 3.5 a y b notamos que el rayo refractado puede construirse gráficamente de una forma muy simple.

Se trazan dos circunferencias a escala apropiada con centro en A: una de radio igual a la unidad (1) y la otra de radio igual a n (r = n). Se prolonga el RI hasta que corte la circunferencia de radio unidad en el punto B. Desde B se traza una perpendicular BC a la superficie de separación, determinándose su intersección D con la circunferencia de radio n. La recta AD es el rayo refractado.

En la figura 3.5 a se tiene que CBA = i y CDA = r; entonces:

$$\text{Sen } i = \text{sen } CBA = \frac{AC}{AB} = \frac{AC}{1} \quad (3.2) \quad (AB = 1)$$

$$\text{Sen } r = \text{sen } CDA = \frac{AC}{AD} = \frac{AC}{n} \quad (3.3) \quad (AD = n)$$

Dividiendo 3.2 entre 3.3, obtenemos: $\text{sen } i / \text{sen } r = \frac{AC/1}{AC/n} = n$

Como el ángulo r satisface la ley de la refracción (fórmula 3.1), la construcción gráfica es correcta.

Es más sencillo, y a veces suficiente, representar la propagación de la luz mediante rayos en vez de ondas. El rayo es la línea de avance, o dirección de propagación, de la energía radiante y, por tanto, perpendicular al frente de onda. En la óptica geométrica se prescinde de la teoría ondulatoria de la luz y se supone que la luz no se difracta. La trayectoria de los rayos a través de un sistema óptico se determina aplicando las leyes de reflexión y refracción.

3.6. ¿A qué llamamos índice de refracción absoluto de una sustancia (n)?

Es el índice de refracción de ella respecto al vacío.

$n = c / v$ (3.4) **Donde:** c es la velocidad de la luz. $c = 300\,000 \text{ km / s}$
v: es la velocidad de la luz en la sustancia.
 $n > 1$ siempre que $c > v$.

3.7. ¿A qué llamamos índice de refracción relativo (n')?

$$n' = 1 / n \quad (3.5)$$

$$y \quad n = n_2 / n_1 \quad (3.6)$$

3.8. ¿A qué llamamos reflexión total?

Ocurre cuando la luz llega a un medio menos refringente (menos denso) y los rayos que se reflejan son aquellos cuyo ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite. (Fig. 3.6)

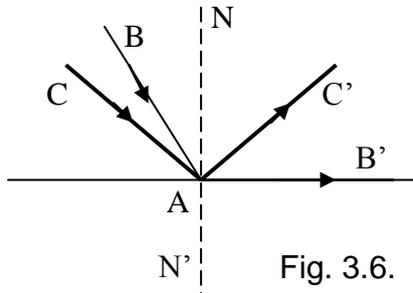


Fig. 3.6.

Donde: Los rayos CA y AC' describen una reflexión total

λ es el ángulo límite.

AB': Rayo refractado rasante.

$$\text{Sen } \lambda = n = n_2 / n_1 \quad \text{ó} \quad \text{sen } \lambda = 1 / n' \quad (3.7)$$

La reflexión total de los rayos de luz se obtiene utilizando un prisma rectangular de reflexión total que permite producir un giro de 90° en la marcha del rayo de luz.

Este fenómeno se pone de manifiesto en instrumentos ópticos (microscopios, prismáticos, etc.)

Ejemplo 2: Calcula el ángulo límite del vidrio ordinario (crown) respecto al aire.

Datos: $\text{sen } 41,1^\circ = 0,6578$; $n_{(\text{vidrio} - \text{aire})} = 1,52$

Respuesta: $\text{sen } \lambda = 1 / n' = 1 / 1,52 = 0,6578$; $\lambda = 41,1^\circ$

a) ¿Qué fenómeno ocurre si un rayo de luz incide con un ángulo mayor al calculado?

Reflexión total.

b) ¿Qué fenómeno ocurre si un rayo de luz incide con un ángulo menor al calculado?

Refracción.

Ejemplo 3: Conociendo el índice de refracción absoluto del agua (1,33) y el del vidrio flint (1,65). Calcula.

a. La velocidad de la luz en el agua

b. El índice de refracción del agua respecto al vidrio flint.

c. El índice de refracción del vidrio flint relativo al agua. $c = 300\,000 \text{ km/s}$

$$V_{\text{agua}} = c / n = 300\,000 \text{ km/s} / 1,33 = \mathbf{225\,564 \text{ km/s}}$$

$$V_{\text{flint}} = c / n = 300\,000 \text{ km/s} / 1,65 = \mathbf{181\,818 \text{ km/s}}$$

$$N = v_{\text{flint}} / v_{\text{agua}} = 181\,818 \text{ km/s} / 225\,564 \text{ km/s} = \mathbf{0,8}$$

$$N = v_{\text{agua}} / v_{\text{flint}} = 225\,564 \text{ km/s} / 181\,818 \text{ km/s} = \mathbf{1,24}$$

3.9. Refracción de la luz a través de una lámina plana de caras paralelas.

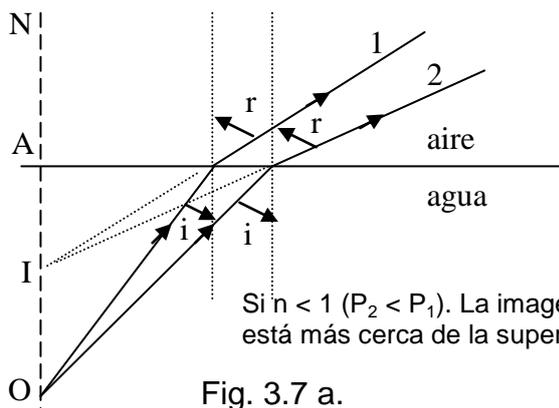


Fig. 3.7 a.

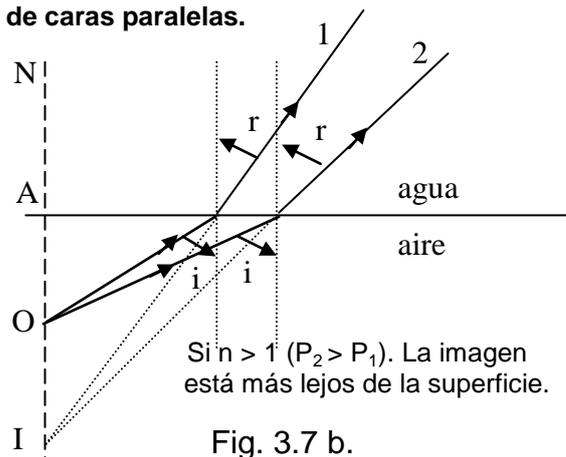


Fig. 3.7 b.

Si tenemos un objeto transparente (O), situado en un medio transparente 1 y 2, otro medio transparente separado del primero por una superficie plana (S). Si tenemos en cuenta los rayos luminosos provenientes del objeto que forman ángulos pequeños con la normal (NO), los rayos refractados prolongados por detrás de la superficie concurren en un punto I que es la imagen virtual de (O). (Fig. 3.7 a y b)

$$P_2 = n \cdot P_1 \quad (3.8)$$

Donde: P_1 : Distancia OA; P_2 : Distancia IA; P: Profundidad.

De otra forma: Si la luz pasa de un medio más denso a otro menos denso, la imagen se observa más cerca de la superficie que el objeto y viceversa.

Ejemplo 4: Coloca un lápiz dentro de un vaso con agua.

Ejemplo 5: Una moneda esta en el fondo de un cubo con agua a 30 cm de profundidad, ¿a qué profundidad aparente se observa la moneda al mirarla oblicuamente?

Datos: $P_1 = 30$ cm (profundidad real); $P_2 = ?$ (profundidad aparente)

Respuesta: $P_2 = n \cdot P_1$ $n = 1 / n'$
 $P_2 = (1 / n') \cdot P_1 = (1 / 1,33) \cdot 30$ cm = **22,56 cm**

3.10. ¿Cómo ocurre el fenómeno de la refracción en una lámina de caras paralelas?

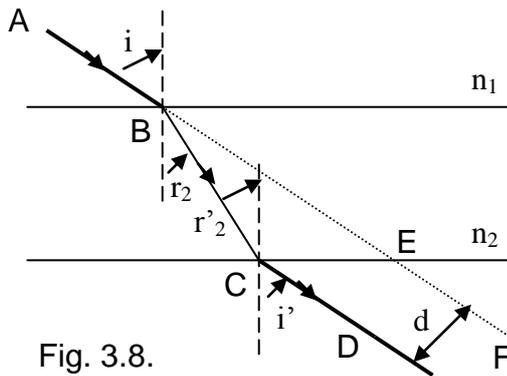


Fig. 3.8.

El rayo (AB) al incidir sobre la primera superficie se refracta bajo un ángulo (r_2) y se propaga como (BC) hasta incidir en la segunda superficie, donde experimenta otra refracción y emerge como (CD), donde está claro que (CD) es paralelo a (AB), experimentando solo un desplazamiento lateral. (Fig. 3.8)

El índice de refracción relativo de las dos sustancias es igual al cociente de dividir entre sí sus respectivos índices de refracción absoluto.

$$\text{Sen } i / \text{sen } r = n_2 / n_1 \quad (3.9)$$

Cuando un rayo de luz atraviesa una lámina de caras paralelas no experimenta desviación, el rayo emergente es paralelo al incidente.

3.11. ¿Se observan los objetos en la misma posición cuando lo observamos a simple vista y través de una lámina de caras paralelas?

De no existir la lámina, el rayo incidente pasaría por E y emergería por F. Si se interpone la lámina, está lo obligaría a emerger por C, paralelamente a su dirección primitiva. Todo ocurre como si el rayo primitivo hubiese sido trasladado paralelamente a sí mismo de EF a CD. El efecto de una lámina de caras paralelas se reduce a trasladar los rayos paralelamente a sí mismos, sin desviarlos.

3.12. ¿A qué llamamos prisma óptico?

Medio refringente (vidrio transparente, sal de gema, cuarzo, etc.) de índice de refracción constante, limitado al menos por dos caras planas que se cortan en una arista formando un ángulo diedro. Donde toda sección perpendicular a ella se llama sección principal del prisma. (Fig.3.9)

Los prismas tienen cinco elementos fundamentales: arista, ángulo refringente, sección principal, base e Índice de refracción.

Todo rayo luminoso que atraviesa un prisma sufre una desviación y si su índice de refracción es superior al del espacio circundante, se acerca a la base.

El rayo incidente será el de entrada y el rayo emergente será el de salida (se forma después de sufrir la refracción).

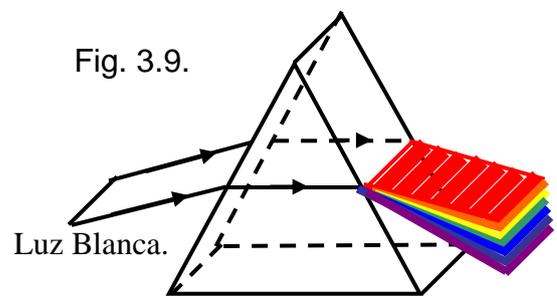


Fig. 3.9.

El ángulo que entre sí forman el rayo incidente y el emergente es el ángulo de desviación, el cual depende de los siguientes factores: ángulo refringente del prisma, Índice de refracción, ángulo de incidencia y longitud de onda del rayo incidente.

3.13. Características generales de los prismas.

1. Es un sistema óptico centrado.
2. Presentar potencia positiva elevada, a través de los cuales se observan los objetos con un diámetro aparentemente mayor del que tiene realmente.
3. Poseen poder amplificador.
4. Se utiliza como ayuda visual en la corrección de ametropías elevadas.

Para lograr buenos prismas espectrales deben construirse de un material transparente en la región del espectro que se investiga, que posea gran dispersión y un grado muy elevado de homogeneidad óptica

e isotropía, de fácil elaboración y bastante barato (vidrio flint). Reunir todas estas condiciones es bastante difícil, por eso en la mayoría de los casos los prismas son pequeños

Ejemplos de algunos prismas:

1. De visión directa.
2. Acromáticos.
3. De reflexión total (Prisma de Porro 1era y 2da Clase, Prisma de dispersión con desviación constante de 90°, Prisma especular: Pentaprisma, Prisma especular con inversión completa, Prisma inversor de Dove y Prisma de retrovisión de Daubresse).
4. De Fresnel.

3.14. ¿Para qué se utilizan los prismas?

1. Para descomponer la luz espectralmente, por refracción.

Ejemplo: En los espectrómetros se utilizan generalmente uno o varios prismas sencillos con un ángulo refringente de unos 60° colocados en posición de mínima desviación, donde es muy importante tener en cuenta el poder separador, el cual depende de la longitud de la base.

2. Para cambiar la dirección de los rayos luminosos, por reflexión.

Ejemplo: En los prismáticos se utilizan combinaciones de prismas sencillos con un ángulo refringente de 90° colocados uno frente a la base del otro, para cambiar la dirección del rayo de luz por reflexión.

3. En Óptica oftálmica se usan:

- a) Para medir las desviaciones.
- b) Determinar hasta que punto pueden desviarse los ojos en paralelismo.
- c) Para descubrir la ceguera simulada.
- d) Ejercitar los músculos débiles.
- e) Como tratamiento.
- f) Expresión de su potencia.
- g) Para contrarrestar los efectos de las parálisis, o insuficiencia.

3.15. ¿Cómo viaja la luz a través de un prisma?

En la figura 3.10 se muestra un prisma de vértice o ángulo diedro (A), base BC e índice de refracción n, mayor que el del medio que lo rodea, sobre el cual incide un haz de luz monocromática (OM) en la cara AB, que experimenta una doble refracción, emergiendo del prisma como (RP) bajo el ángulo (d), el cual depende del ángulo de incidencia (i₁) del rayo (OM) en el prisma.

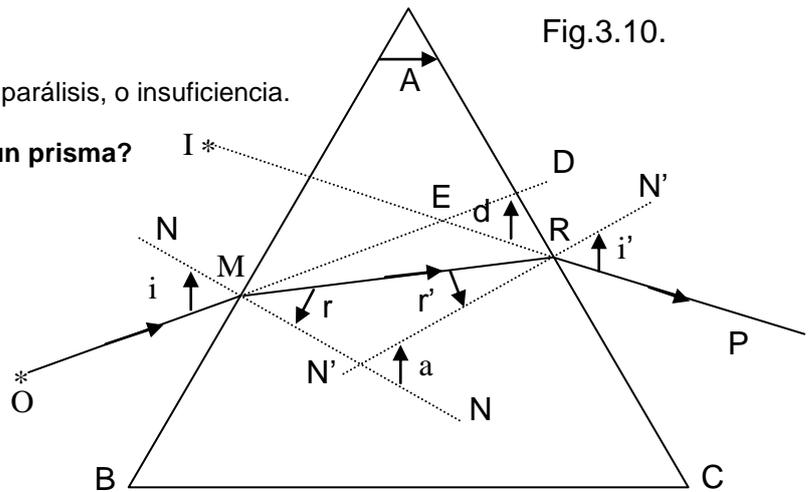


Fig.3.10.

ABC, es la sección principal del prisma y cuando el rayo OM incide sobre la cara AB, en M, este se refracta acercándose a la normal (NN) al punto M.

El rayo interior continúa su recorrido y al encontrarse con la segunda cara AC, en R, Este se refracta alejándose de la normal (N'N') al punto R. Debido a que la refracción tiene lugar de un medio más refringente a otro menos refringente.

En la refracción que tiene lugar en M, el rayo se acerca a la base, ya que gira un determinado ángulo r acercándose a la normal NN y en su siguiente refracción en R el rayo se acerca nuevamente a la base, porque giró un nuevo ángulo i' alejándose de la normal N'N'. Como las dos desviaciones están dirigidas en igual sentido y siempre debe ocurrir lo mismo, si el índice de refracción del prisma es mayor que el del medio exterior, se puede afirmar que:

Siempre que la luz atraviesa un prisma de índice de refracción superior al del medio exterior, esta se desvía hacia la base del prisma.

En la figura 3.9 el ángulo DEP es igual a la desviación (d) entre el rayo incidente y el emergente y esta formado evidentemente por sus prolongaciones.

Si el índice de refracción del prisma es menor que el del medio exterior, como ocurre cuando sumergimos en el agua un recipiente de vidrio lleno de aire que tiene dos caras inclinadas, el resultado es opuesto y podemos afirmar que:

Siempre que la luz atraviesa un prisma de índice de refracción menos al del medio exterior, esta se desvía hacia el vértice del prisma.

3.16. ¿Cuáles son las fórmulas fundamentales del prisma?

Cuando el prisma es atravesado por un haz de rayos monocromáticos de pequeña abertura procedentes de un foco (O), el rayo emergente parece provenir del punto (I) y se puede caracterizar el prisma utilizando las siguientes expresiones.

Si ABC es la sección principal del prisma de índice de refracción n (Fig. 3.11) y el rayo OM incide sobre el mismo por la cara AB en el punto M, entonces se cumple la ley de la refracción, de manera que si i representa el ángulo de incidencia, r será el ángulo de refracción.

$$n = \text{sen } i / \text{sen } r$$

despejando sen i, obtenemos:

$$\text{sen } i = n \cdot \text{sen } r \quad (3.10)$$

Pero en virtud del principio del camino inverso de la luz, si un rayo incide según PR, se refracta según RM y emerge como MO. Si i' es ahora el ángulo de incidencia y r' es el ángulo de refracción.

$$n = \text{sen } i' / \text{sen } r'$$

Despejando sen i, obtenemos: $\text{sen } i' = n \cdot \text{sen } r' \quad (3.11)$

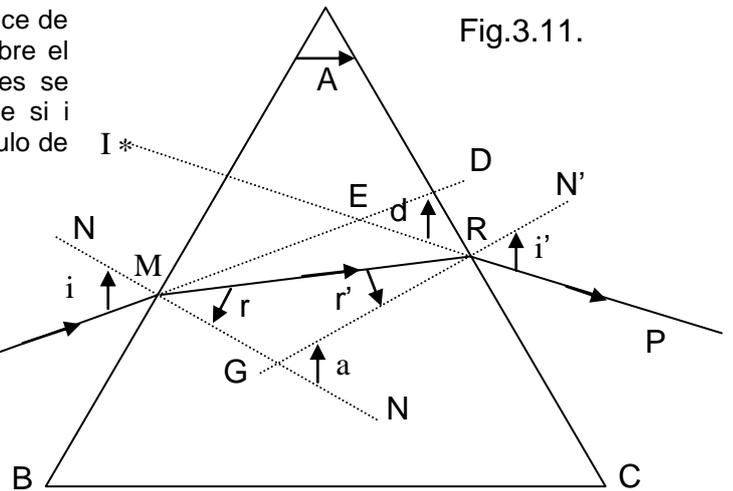


Fig.3.11.

Observe la figura 3.10 y note que las prolongaciones de las normales NN y N'N' a los puntos M y R respectivamente se interceptan en G, formando el ángulo a que es igual a el ángulo A del prisma, por tener ambos sus lados mutuamente perpendiculares, entonces: $a = r + r'$ y como $a = A$;

$$A = r + r' \quad (3.12)$$

Por otra parte si en la figura 3.10 el ángulo DEP es igual a la desviación (d) y conocemos los valores de i e i', podemos encontrar una expresión para determinar d siguiendo este razonamiento:

$$d = b + c \quad (3.13)$$

Pero como el ángulo $b + r$ es opuesto por el vértice a i, entonces: $b + r = i$;

Donde $b = i - r \quad (3.14)$

Como el ángulo $c + r'$ es opuesto por el vértice a i', entonces: $c + r' = i'$

Donde $c = i' - r' \quad (3.15)$

Sustituyendo las expresiones 3.14 y 3.15 en 3.13 obtenemos:

$$d = i - r + i' - r'; \text{ agrupando: } d = i + i' - (r + r') \quad (3.16)$$

Sustituyendo la expresión 3.12 en 3.16, obtenemos:

$$d = i + i' - A \quad (3.17)$$

Ejemplo 6: Sobre un prisma cuyo índice de refracción es igual a 1,65 incide un haz de luz monocromática, con un ángulo de $30,5^\circ$ el cual se refracta bajo un ángulo de 30° y en la cara de salida experimenta otra refracción con un ángulo de 15° . $\text{sen } 15^\circ = 0,26$; $\text{sen } 25,5^\circ = 0,43$

- a) ¿De qué material está hecho el prisma?
- b) Determina el ángulo del prisma.
- c) Calcula la desviación del rayo incidente respecto al emergente.

Respuestas: a) Vidrio Flint.

b) Datos: $A = ?$ $r = 30^\circ$ $r' = 15^\circ$

$$A = r + r'$$

$$A = 30^\circ + 15^\circ$$

$$A = 45^\circ$$

c) Datos: $d = ?$ $n = 1,65$ $i = 30,5^\circ$

$$d = i + i' - A; \quad i' = ?$$

$$d = 30,5^\circ + 25,5^\circ - 45^\circ$$

$$d = 11^\circ$$

$$n = \text{sen } i' / \text{sen } r'$$

$$\text{sen } i' = n \cdot \text{sen } r'$$

$$\text{sen } i' = 1,65 \cdot \text{sen } 15^\circ$$

$$\text{sen } i' = 0,43$$

$$i' = 25,5^\circ$$

3.17. ¿De qué depende la desviación de un prisma?

Depende del ángulo de incidencia, del índice de refracción del prisma relativo al medio que lo rodea y del ángulo del prisma.

Cuando el índice de refracción del prisma es mayor que la unidad, la desviación aumenta con el ángulo del prisma y con su índice de refracción, de manera tal que para cierto ángulo de incidencia la desviación tiene un valor mínimo.

3.18. ¿Cuándo ocurre la desviación mínima?

Cuando el rayo interior (MR) es perpendicular a la bisectriz (AF) del ángulo del prisma, siendo simétrica la trayectoria del rayo y las distancias (MA = AR). (Fig. 3.12)

Cuando los ángulos de incidencia y emergencia son iguales ($i = i'$).

Donde: d_m : Desviación mínima.

3.19. ¿Cómo determinar el valor del índice de refracción de la sustancia de que está hecho el prisma?

En el caso particular en que la desviación del rayo de luz en mínima, tenemos que:

$i = i'$ y las expresiones 3.10 y 3.11 se reducen a la igualdad $r = r'$.

En este caso las fórmulas 3.12 y 3.13 toman las formas:

$$2r = A \quad (3.12 \text{ a}) \quad \text{y}$$

$$d = 2i - A \quad (3.13 \text{ a})$$

Despejando r e i respectivamente, obtenemos:

$$r = A/2 \quad (3.12 \text{ b}) \quad \text{e} \quad i = \frac{A + d_m}{2} \quad (3.13 \text{ b})$$

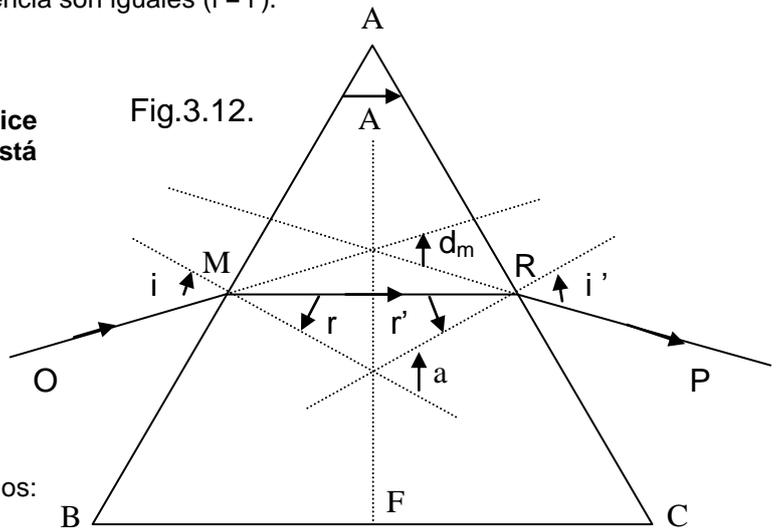


Fig.3.12.

$$\text{Despejando la expresión 3.10 y sustituyendo 3.12 b y 3.13 b obtenemos: } n = \frac{\text{sen} \frac{A + d_m}{2}}{\text{sen} \frac{A}{2}} \quad (3.18)$$

La expresión 3.18 fue planteada por Newton y se utiliza para medir el índice de refracción de un prisma.

Ejemplo 7: El ángulo de un prisma es de 60° y su índice de refracción 1,5.

a) Calcula la desviación del rayo incidente respecto al emergente si el ángulo de incidencia es igual a 40° .

b) Calcula la desviación mínima producida por el prisma.

Datos: $\text{sen } 40^\circ = 0,6428$ $\text{sen } 34,6^\circ = 0,5678$ $\text{sen } 30^\circ = 0,5$
 $\text{sen } 25,4^\circ = 0,4285$ $\text{sen } 58,4^\circ = 0,8517$ $\text{sen } 48,6^\circ = 0,75$

Datos: $A = 60^\circ$ a) $d = ?$ $n = 1,5$ b) $d_m = ?$ $i = 40^\circ$

Respuesta.

a) $d = i + i' - A$; $i'_1 = ?$	$n = \text{sen } i' / \text{sen } r'$	$A = r + r'$	$n = \text{sen } i / \text{sen } r$
$d = 40^\circ + 58,4^\circ - 60^\circ$	$\text{sen } i' = n \cdot \text{sen } r'$; $r' = ?$	$r' = A - r$; $r = ?$	$\text{sen } r = \text{sen } i / n$
$d = 38,4^\circ$	$\text{sen } i' = 1,5 \cdot \text{sen } 34,6^\circ$	$i'_2 = 60^\circ - 25,4^\circ$	$\text{sen } r = \text{sen } 40^\circ / 1,5$
	$\text{sen } i' = 1,5 \cdot 0,5678$	$i'_2 = 34,6^\circ$	$\text{sen } r = 0,6428 / 1,5$
	$\text{sen } i' = 0,8517$		$\text{sen } r = 0,4285$
	$i' = 58,4^\circ$		$r = 25,4^\circ$

b) $\text{sen } \frac{1}{2} (A + d_m) = n \text{sen } A / 2$

$$\text{sen } \frac{1}{2} (A + d_m) = 1,5 \text{sen } 60^\circ / 2 = 1,5 \text{sen } 30^\circ = 0,75$$

$$\frac{1}{2} (A + d_m) = 48,6^\circ$$

$$A / 2 + d_m / 2 = 48,6^\circ$$

$$d_m = (48,6^\circ - A / 2) \cdot 2 = (48,6^\circ - 60^\circ / 2) \cdot 2 = 37,2^\circ$$

3.20. Imágenes dadas por los prismas.

Cuando una cara de un prisma recibe los rayos de un objeto situado en el infinito, los haces incidentes son paralelos, e igual ocurre con los haces interiores y emergentes. Por lo tanto a un observador en O

le parece que los rayos le llegan desde el infinito, pero en una dirección distinta. Como los rayos conservan su paralelismo, las imágenes de los puntos del infinito se hallan en el infinito.

Si el objeto es un punto B situado a una distancia finita, al pincel incidente limitado por los rayos BC y BD, corresponde el pincel emergente limitado por los rayos EH y JK (Fig. 3.13).

La experiencia y la teoría prueban que las prolongaciones de los rayos del pincel emergente concurren prácticamente en cierto punto B', cuando el prisma está en la posición de desviación mínima para el rayo medio del pincel incidente. En este caso la imagen de un punto B es otro punto B'. Nótese que si el objeto B es real, la imagen B' es virtual y que si B es virtual, la imagen B' será real.

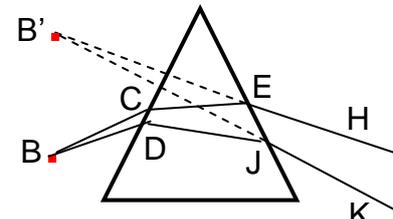


Fig. 3.13.

3.21. ¿Qué se entiende por condición de emergencia?

No todos los rayos que inciden en un prisma pueden emerger del mismo y existen prismas de los cuales no sale ninguno de los rayos que penetra.

Condición de emergencia: Para que exista algún rayo que emerja, después de haber penetrado en un prisma, es necesario que el ángulo refringente del prisma sea menor que el doble del ángulo límite de la sustancia que lo forma.

Cuando el rayo emergente (RE) se aleja de la normal al entrar en un medio menos denso, y esta desviación aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia (i), hay un determinado ángulo de incidencia, denominado ángulo crítico o ángulo límite, para el cual el rayo refractado forma un ángulo ($i' = 90^\circ$) con la normal, por lo que avanza justo a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados. (Fig. 3.14) La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso.

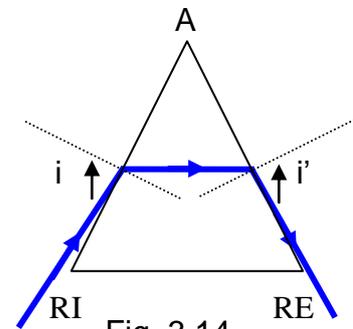


Fig. 3.14.

Los prismas se fabrican de materiales cuyos índices de refracción varían de 1,5 a 1,8; de aquí se deduce, que en la teoría los ángulos refringentes máximos pueden variar de 84° a 67° , pero en la práctica deben ser algo menores. Generalmente suelen usarse prismas de ángulo refringente aproximadamente igual a 60° .

3.22. ¿Cómo determinar el valor del ángulo A del prisma si este es muy pequeño?

En esta situación los ángulos de incidencia de la luz en la cara de entrada y en la de salida (i e i') son muy pequeños y por tanto los ángulos de refracción de la luz en la cara de entrada y salida (r y r') también lo son (Fig. 3.15). Como consecuencia de esta situación particular, la expresión 3.17 se puede escribir de esta forma:

$$d = (n - 1) \cdot A \quad (3.19)$$



Fig. 3.15

Ejemplo 8: Sobre un prisma de índice de refracción igual a 1,52 y ángulo de 10° , incide un haz de luz monocromática. Determina la desviación del haz de luz monocromática que produce el prisma. **Datos:** $n = 1,52$. $A = 10^\circ$ $d = ?$

Respuesta: $d = (n - 1) \cdot A = (1,52 - 1) 10^\circ = 5,2^\circ$

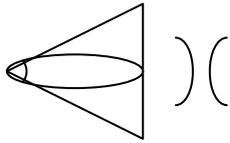
Los prismas de ángulo pequeño tienen gran importancia para la Óptica Oftálmica, ya que se colocan delante de los ojos que padecen de estrabismo para corregir la dirección de la mirada.

3.23. Clasificación de los prismas oftálmicos.

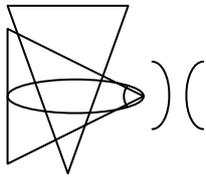
1. Prisma corrector u oftálmico: Son los que se utilizan en la práctica con fines correctores. Por ejemplo, en los trastornos de la musculatura externa del ojo.
2. Prisma de medida: Utilizados con fines diagnósticos.
3. Prisma escalonado: Estos prismas pueden montarse sobre los espejuelos convencionales, estos prismas dan una visión mejor y con menos distorsiones que la que se obtiene con los prismas clásicos.

La relación entre el poder del prisma y el espesor de la base es directamente proporcional. La base da la posición a la que se debe colocar el prisma. A medida que aumenta la base (espesor), aumenta el poder de desviación del prisma (poder prismático).

Estos prismas se pueden colocar con la base interna, externa, superior o inferior. En dependencia de las situaciones, la solución a un problema determinado puede ser la combinación de dos prismas.



Ejemplo 9: Representa un prisma simple de base interna para un ojo derecho de 3Δ . La desviación está externa, y la base se coloca contraria a la desviación.



Ejemplo 10: Representa un prisma cruzado de 4Δ donde la base externa sea igual a la superior para un ojo derecho. Primero se lee el horizontal y segundo se lee el vertical.

El frontofocómetro nos permite una rápida medición del poder prismático, ya que está provisto de un retículo graduado para tales mediciones.

3.24. ¿Qué es un Prisma de Reflexión Total?

Cuerpo de vidrio transparente limitado por dos o más caras planas, donde se cambia a voluntad la dirección de los rayos y se invierten las imágenes. De manera tal que cuando el rayo de luz incide en la segunda cara, en lugar de refracción experimenta una reflexión total, emergiendo por la cara de entrada o por otra cara.

Un número impar de reflexiones sucesivas convierte la imagen en otra simétrica pero invertida respecto a un plano, con un número par de reflexiones sucesivas la imagen no cambia. El prisma de reflexión total debe ser de 90° , conocido como prisma de tejado. Este ángulo debe ser determinado correctamente para que los bordes de las imágenes no resulten duplicados. (Fig. 3.16 a, b y c)

Estos prismas son de gran importancia en la construcción de instrumentos ópticos como: microscopios, telescopios y prismáticos.

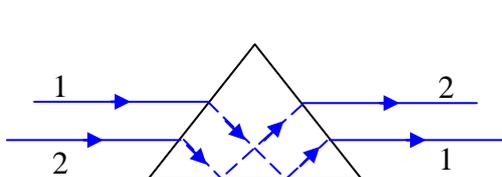


Fig. 3.16 a.

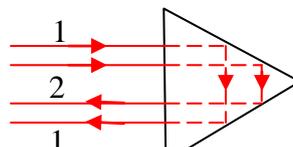


Fig. 3.16 b.

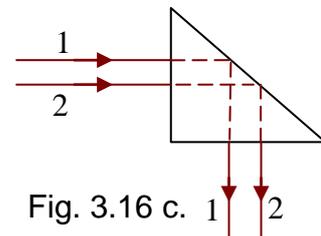


Fig. 3.16 c.

Como prisma de reflexión, además del prisma simple rectangular, se utilizan otros de diferente geometría y frecuentemente sistemas compuestos de prismas rectangulares tales como:

1. **Prismas de Porro de primera y segunda clase:** Donde los de primera clase determinan un corrimiento lateral y otro en la altura del eje y los de segunda clase comunican solo un corrimiento lateral. (Fig. 3.17 a y b)

Primera clase.

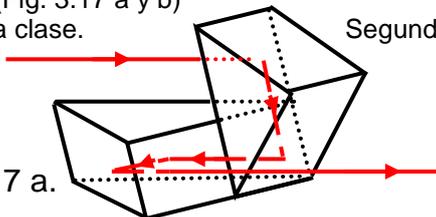


Fig.3.17 a.

Segunda clase.

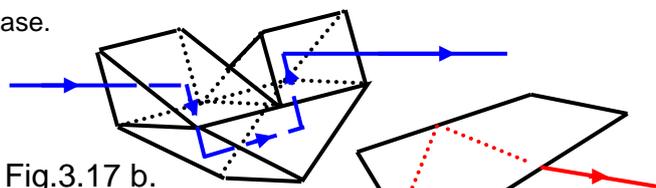


Fig.3.17 b.

2. **Prisma de Dispersión:** Es aquel donde la luz al penetrar por una cara experimenta una reflexión total bajo un ángulo de 90° y emerge por otra cara. (Fig. 3.18)

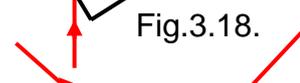


Fig.3.18.

3. **Prisma especular o Pentaprisma:** Tiene la forma de un pentágono y al penetrar la luz por una cara experimenta una doble reflexión en su interior bajo ángulos de 45° aproximadamente y emerge por otra cara perpendicular a la de entrada formando un ángulo de 90° con el rayo incidente. En este la desviación es constante aunque no es un prisma de inversión puede utilizarse como tal añadiéndole un prisma simple de tejado. (Fig. 3.19)

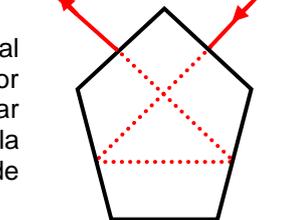


Fig.3.9

4. Prisma de Schmidt o Especular con inversión completa:

Es un prisma de seis caras donde se realizan cuatro reflexiones simples. Si se utiliza la parte del tejado donde se produce una reflexión doble se tiene un prisma de inversión para visión inclinada. (Fig. 3.20)

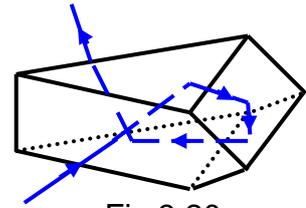


Fig.3.20.

5. Prisma de retrovisión de Daubresse: Tiene siete caras y en el se producen tres reflexiones en ángulo recto de manera que la luz es devuelta en la misma dirección de incidencia. (Fig. 3.21)

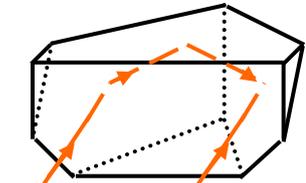


Fig.3.21.

6. Prisma inversor de Dove: Con tejado o sin el es aquel donde intervienen decisivamente las refracciones en las caras de entrada y salida. Este influye en la marcha de los rayos como si se hubiese interpuesto una lámina plano-paralela en posición oblicua a los rayos.

Para evitar el astigmatismo solo puede utilizarse con marcha de rayos paralela. (Fig. 3.21)

Existen otros prismas como:

1. De visión directa (Amici): Constan como mínimo de tres prismas pegados uno a continuación de otro donde el del centro es el de mayor dispersión y los otros dos están colocados a ambos lados en posiciones idénticas.

La refringencia media y el ángulo del prisma se eligen de modo que la desviación total sea nula para un color. (Fig. 3.23)

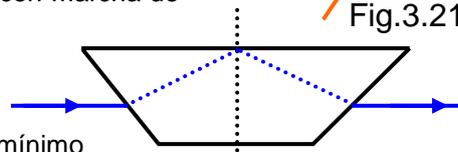


Fig.3.22.

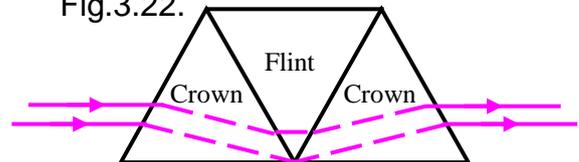


Fig.3.23.

2. Acromáticos: Es una combinación de dos prismas de vidrio de índices de refracción distintos (generalmente uno de flint y otro de crown) de modo que la arista de uno de ellos quede en contacto con la base del otro. Eligiendo adecuadamente los ángulos refringentes y la clase de vidrios, se consigue un acromatismo para dos longitudes de onda, o sea, para dos colores.

3. Prisma de Fresnel: Es un prisma paralelepípedo, de vidrio que sirve para convertir en luz polarizada circularmente la luz rectilíneamente polarizada que recibe.

Los prismas también se utilizan para descomponer la luz en los espectrómetros. Se utilizan generalmente uno o varios prismas sencillos con un ángulo de 60° colocados en posición de mínima desviación, donde es muy importante el poder separador del prisma o del conjunto de prismas y es decisiva la longitud de la base.

3.25. La fibra óptica es una nueva aplicación práctica de la reflexión total. Cuando la luz entra por un extremo de un tubo macizo de vidrio o plástico, puede verse reflejada totalmente en la superficie exterior del tubo y, después de una serie de reflexiones totales sucesivas, salir por el otro extremo. Es posible fabricar fibras de vidrio de diámetro muy pequeño, recubrirlas con un material de índice de refracción menor y juntarlas en haces flexibles o placas rígidas que se utilizan para transmitir imágenes. Los haces flexibles, que pueden emplearse para iluminar además de para transmitir imágenes, son muy útiles para la exploración médica, ya que pueden introducirse en cavidades estrechas e incluso en vasos sanguíneos.

3.26. ¿En qué consiste el fenómeno de Dispersión de la Luz?

Las primeras investigaciones sobre la dispersión de la luz con un prisma triangular de vidrio fueron realizadas por el científico inglés Thomas Harriot (1560-1621) y por el naturalista checo Jan Marci von Kronland (1595-1667), pero sus observaciones no fueron sometidas a un análisis suficientemente serio y sus deducciones no se comprobaron con experimentos complementarios hasta que Isaac Newton realizara una serie de experimentos ópticos que explican estos fenómenos.

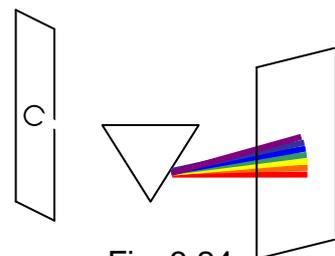


Fig. 3.24.

En un día claro de sol, serramos una habitación y dejamos pasar un haz de luz blanca que forma una mancha clara en la pared. Si se pone un prisma de vidrio en el camino del rayo, la mancha se convierte en una banda policroma donde se aprecian todos los colores del arcoiris. (Fig. 3.24)

3.27. ¿A qué llamamos Dispersión de la Luz?

Es el fenómeno de descomposición de la luz solar (blanca) por un prisma de vidrio en diferentes colores: violeta, añil, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. La luz blanca no es la principal, es policromática, compuesta por siete colores básicos. (Tabla. 3.1)

Luz monocromática: Es aquella en que su longitud de onda varía desde λ hasta $\lambda + \Delta\lambda$ y cumple con la condición $\Delta\lambda / \lambda \ll 1$. En la práctica la máxima monocromaticidad se logra utilizando un láser, donde $\Delta\lambda / \lambda$ puede ser del orden de 10^{-6} e incluso menor.

La dispersión depende del material con que está construido el prisma, de su índice de refracción, del ángulo del prisma y de la longitud de onda de la luz que incide sobre él. Generalmente los prismas más dispersivos están hechos de flint pesado y con un ángulo de 60° .

Color.	Longitud de onda (μm).
Violeta	0,4 ...0,45
Añil	0,45...0,5
Azul	0,5 ... 0,53
Verde	0,53...0,57
Amarillo	0,57...0,59
Naranja	0,59...0,62
Rojo	0,62...0,75

Tabla.3.1.

3.28. ¿A qué llamamos dispersión angular de un prisma?

Desviación que sufren los rayos de diferentes longitudes de onda a los cuales corresponden índices de refracción diferentes cuando viajan en el interior del prisma cuando un haz de luz blanca incide sobre él.

Debido a esto, cuando la incidencia de la luz blanca no es normal a la superficie refractora, cada longitud de onda que compone la luz, se refracta propagándose a diferentes velocidades y en diferentes direcciones en el interior del medio, dando lugar a la formación de distintos ángulos de refracción, dispersándose la luz en forma de abanico.

A cada banda de este abanico, le corresponde una radiación de distinta longitud de onda, ordenándose el espectro, desde las longitudes de onda mayores, a las que les corresponde el color rojo, hasta las longitudes de onda más cortas, a las que les corresponde el color violeta, formándose así un espectro de luces de colores. Esto se debe a que las radiaciones de longitudes de onda largas, se propagan a más velocidad y se refractan menos, mientras que las longitudes de onda más corta se propagan a menos velocidad y se desvían más.

La dispersión es mayor para el color violeta que para el rojo ya que este tiene una mayor longitud de onda.

Si el prisma esta situado en condiciones de desviación mínima, la desviación angular se puede determinar con la expresión 3.20.

$$D = \frac{\Delta d}{\Delta \lambda} = \frac{2 \text{sen} \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \cdot \text{sen}^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \quad (p) \quad (3.20)$$

Donde: $\Delta n / \Delta \lambda$ es la dispersión de la sustancia y depende de las propiedades del material de que esta hecho el prisma.

Si el ángulo del prisma es igual a 60° la desviación angular se puede determinar con la expresión 3.21.

$$D = \frac{\Delta d}{\Delta \lambda} = \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \quad (p) \quad (3.21)$$

3.29. Dioptría Prismática (p): Es la unidad de medida de la desviación producida por un prisma óptico a una distancia determinada.

Es directamente proporcional: La relación entre el poder del prisma y el espesor de la base. La base es la que da la posición a la que se debe colocar el prisma. A medida que aumenta la base (espesor), aumenta el poder de desviación del prisma (poder prismático).

3.30. ¿En qué consiste el poder separador del prisma (R)?

Depende del largo o espesor de la base (T) y la dispersión de la sustancia de que esta echo (preferiblemente flint pesado) y no del ángulo del prisma. El poder resolutivo máximo de un prisma se consigue en condiciones de mínima desviación y se determina con la expresión 3.22.

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = T \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \quad (3.22) \quad \text{Donde: } \lambda: \text{ Es la longitud de onda de la luz.}$$

n : Es el índice de refracción. T : Es el espesor de la base.

El frontofocómetro nos permite una medición más rápida del poder separador del prisma, ya que está provisto de un retículo graduado para tales mediciones.

Uno de los defectos más considerables del prisma es la rápida disminución de su poder resolutivo junto con la dispersión a medida que nos desplazamos de la zona azul del espectro a la roja.

Ejemplo 11: El poder resolutivo de un prisma (de flint pesado) de base igual a 5 cm es aproximadamente 5000 en la zona roja del espectro y de 15 000 en la zona azul.

Ejemplo 12: Para separar dos rayas D de sodio, cuya separación es de 6 amstron es preciso un poder resolutivo de 1000, o sea es suficiente un prisma de vidrio flint pesado de base igual a 1 cm.

3.31. Tareas generales del capítulo.

Ejercicios teóricos.

1. ¿A qué llamamos refracción óptica?
2. ¿Cuáles son las Leyes de la Refracción Óptica?
3. ¿En qué consiste el principio de Fermat?
4. ¿Cómo explicar la ley de la refracción utilizando el principio de Fermat?
5. ¿Qué plantea el principio de Huygens sobre la propagación de la luz?
6. ¿A qué llamamos índice de refracción absoluto de una sustancia (n)? Plantea la expresión para determinarlo e identifica cada término.
7. ¿A qué llamamos índice de refracción relativo (n')? Plantea la expresión para determinarlo e identifica cada término.
8. ¿Cuándo ocurre la reflexión total de un rayo de luz?
9. ¿Cómo ocurre el fenómeno de la refracción en una lámina de caras paralelas?
10. ¿A qué llamamos prisma óptico?
11. ¿Cuáles son las características generales de los prismas? Ponga ejemplos.
12. ¿Para qué se utilizan los prismas? Ponga ejemplos.
13. ¿Cómo viaja la luz a través de un prisma?
14. ¿Cuáles son las fórmulas fundamentales del prisma? Identifica cada término.
15. ¿De qué depende la desviación de un prisma?
16. ¿Cuándo ocurre la desviación mínima?
17. Plantea la expresión para determinar el valor del índice de refracción de la sustancia de que está hecho el prisma. Identifica cada término.
18. Describe como se obtienen las imágenes a través de un prisma.
19. ¿Qué se entiende por condición de emergencia?
20. Plantea la expresión para determinar el valor del ángulo A del prisma si este es muy pequeño.
21. ¿Cómo se clasifican los prismas oftálmicos? Ponga ejemplos de su aplicación.
22. ¿Qué es un Prisma de Reflexión Total?
23. ¿En qué consiste el fenómeno de Dispersión de la Luz?
24. ¿A qué llamamos Dispersión de la Luz?
25. ¿A qué llamamos dispersión angular de un prisma? Plantea la expresión para determinarla e identifica cada término.
26. ¿En qué consiste el poder separador del prisma (R)? Plantea la expresión para determinarlo e identifica cada término.

Ejercicios prácticos.

Índice de refracción. Ley de Snell.

1. La velocidad de la luz en una sustancia es de 275 000 Km / s. Determina el índice de refracción absoluto de la sustancia. $R / N = 1,09$.
2. Conociendo que el índice de refracción absoluto del agua es igual a 1,33 y el del vidrio crown es 1,52.
 - a) Calcula la velocidad de la luz en el agua.
 - b) Calcula el índice de refracción del agua con relación al vidrio crown.
 - c) Calcula el índice de refracción del vidrio crown relativo al agua.
 $R / v = 225\ 564$ Km / s, $n'_{a-c} = 0,88$, $n'_{c-a} = 1,14$
3. En dos sustancias diferentes la velocidad de la luz es 250 000 Km. / s y 200 000 Km. / s. Calcula sus índices de refracción absolutos, y el de cada una de ellas relativo a la otra. $R / N_1 = 1,2$; $N_2 = 1,5$; $n'_{1-2} = 1,25$; $n'_{2-1} = 0,8$.
4. Un rayo de luz blanca se proyecta sobre el agua con un ángulo de incidencia igual a 40° . Calcula el ángulo de refracción y la desviación que experimenta el rayo de luz. $R / r = 28^\circ 54'$; $d = 11^\circ 6'$.

5. ¿Cuál es el ángulo de incidencia de un rayo de luz blanca que pasa del aire al vidrio crown, si el ángulo de refracción es igual a 32° ? $R / i = 53^\circ 39'$.
6. Un rayo de luz pasa del alcohol al aire ($n = 1,36$). Si el ángulo de incidencia es igual a 20° , calcula el ángulo de refracción. $R / r = 27^\circ 43'$.
7. Calcula el índice de refracción de una sustancia si al pasar la luz del aire a ella con un ángulo de incidencia igual a 55° , el ángulo de refracción es de 35° . $R / n' = 1,428$.
8. Calcula el índice de refracción absoluto de una sustancia si al pasar luz del agua a ella con un ángulo de incidencia igual a 38° , el ángulo de refracción es de 45° . $R / N = 1,158$.
9. ¿Cuál es el ángulo límite cuando la luz pasa del (a) agua, (b) vidrio crown al aire? $R / \lambda = 48^\circ 45'$; $\lambda = 41^\circ 9'$.
10. ¿Cuál es el ángulo límite cuando la luz pasa del vidrio crown al agua? $R / \lambda = 61^\circ 3'$.

Prisma.

1. Calcula el valor de la desviación que experimenta un rayo de luz que atraviesa un prisma de vidrio crown cuyo ángulo es de 60° si el ángulo de incidencia de la luz es de 40° . $R / d = 40^\circ 37'$.
2. Calcula la desviación que experimenta un rayo de luz en un prisma hecho de una sustancia cuyo índice de refracción es de 1,6 y está rodeado de otra sustancia cuyo índice es de 1,2; si el ángulo del prisma es de 50° y el ángulo de incidencia es igual a 20° . $R / d = 20^\circ 7'$.
3. Un rayo de luz incide sobre un prisma de vidrio flint, cuyo ángulo es de 40° , si el ángulo de emergencia es igual a 30° . Calcula la desviación del rayo de luz. $R / d = 28^\circ 53'$.
4. La desviación mínima que experimenta un rayo de luz cuando atraviesa un prisma es de 30° . Si el ángulo del prisma es igual 50° , calcula su índice de refracción y el ángulo de incidencia del rayo de luz. $R / n = 1,52$; $i = 40^\circ$.
5. Calcula la desviación mínima que experimenta un rayo de luz en un prisma de vidrio crown si su ángulo es de 48° . $R / dm = 28^\circ 22'$.
6. En un prisma cuyo índice de refracción es igual a 1,5 y ángulo de 60° , el ángulo de incidencia en la segunda cara es de 25° . Calcula la desviación. $R / d = 38^\circ 42'$.
7. Si el ángulo de incidencia de un rayo de luz en un prisma es de 52° y el de emergencia es de 35° . Calcula el ángulo del prisma y su desviación si su índice de refracción es igual a 1,4. $R / A = 58^\circ 26'$ y $d = 28^\circ 34'$.
8. Sobre un prisma de índice de refracción igual a 1,52 y ángulo de 10° , incide un haz de luz monocromática. Determina la desviación del haz de luz monocromática que produce el prisma. $R / d = 5,2^\circ$.
9. Sobre un prisma de índice de refracción igual a 1,6 incide un haz de luz monocromática que se desvía $1,2^\circ$. Determina el ángulo del prisma. $R / A = 2^\circ$.
10. El ángulo de un prisma es igual a 5° . Si sobre él incide un haz de luz monocromática que se desvía $3,3^\circ$. Determina el índice de refracción del prisma. $R / n = 1,66$.
11. Un haz de luz monocromática incide en un prisma con un ángulo de 10° y emerge bajo un ángulo de 7° . Si el índice de refracción del prisma es igual a 1,66. Determine el ángulo del prisma y la desviación que sufre el haz de luz. $R / A = 10,2^\circ$ y $d = 6,7^\circ$.