

### Interferencias en una lámina fina de aceite

En la vida cotidiana es frecuente que se formen capas finas de aceite iridiscente encima del agua, por ejemplo, cuando se derrama aceite usado de motor sobre asfalto húmedo o cuando se deja una sartén "mal fregada" y queda en ella aceite que se ha podido usar, por ejemplo, en una fritura. Al mirar hacia ese suelo o a esa sartén, se observan mosaicos de colores.

Para explicar el proceso responsable de la formación de estos colores, vamos a trabajar con el diagrama mostrado en la figura adjunta, en el que se supone que un rayo de luz blanca

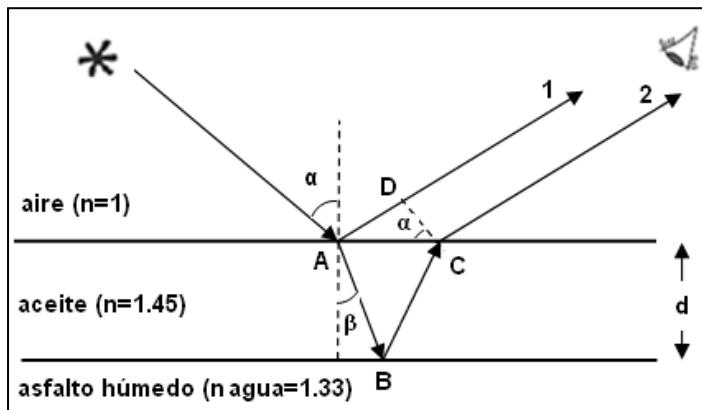


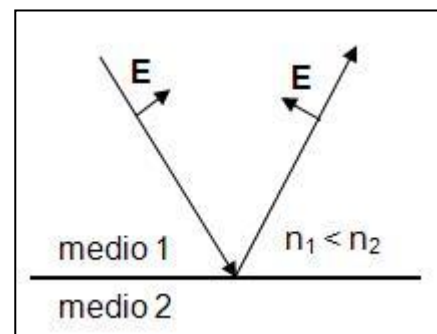
diagrama mostrado en la figura adjunta, en el que se supone que un rayo de luz blanca incide oblicuamente sobre una lámina muy fina de aceite, extendida sobre un suelo de asfalto húmedo. Nuestro propósito es estudiar formalmente las interferencias que se pueden producir entre el rayo 1 (procedente de la reflexión que tiene la luz cuando incide sobre la superficie externa de la lámina de aceite) y el rayo 2 (procedente

del proceso que comienza con la refracción de la luz al pasar del aire al aceite, sigue con la reflexión de esa luz en la superficie interna de la lámina y termina con una última refracción que le lleva de vuelta desde el aceite al aire).

El desfase entre los dos rayos 1 y 2 depende en este caso de dos cuestiones: a) El cambio o no de fase que se pueda producir en las reflexiones. b) La diferencia de camino que recorre la luz.

#### a) Cambios de fase producidos en las reflexiones

Tal como se indica en el dibujo adjunto, la componente del campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia se invierte en un proceso de reflexión de la luz cuando el índice de refracción del medio incidente,  $n_1$ , es menor que el índice de refracción del medio al que se transmite la onda,  $n_2$ . Así pues, cuando se produce una reflexión de estas características ( $n_1 < n_2$ ) la luz sufre un cambio de fase igual a  $\pi$ .



En el proceso que estamos analizando esto ocurre en la reflexión superior (la que da lugar al rayo 1) y trae un desfase  $\Phi_1$  al rayo 1 reflejado con respecto al incidente igual a  $\pi$ :

$$\Phi_1 = \pi$$

#### a) Diferencia de camino que recorre la luz.

La diferencia de camino óptico entre los rayos, 1 y 2, debida a la diferencia recorrido de la luz es:

$$\Delta r = n_{aceite} (AB + BC) - n_{aire} (AD) \quad (1)$$

De la figura se deducen directamente las siguientes relaciones:

$$AB = BC = \frac{d}{\cos \beta} \quad (2a)$$

$$AD = AC \cdot \sin \alpha \quad (2b)$$

$$AC/2 = d \cdot \tan \beta \quad (2c)$$

Al sustituir las expresiones anteriores en (1), teniendo en cuenta que  $n_{\text{aire}} = 1$  y llamando simplemente  $n$  al índice de refracción del aceite, obtenemos:

$$\Delta r = \frac{2 \cdot n \cdot d}{\cos \beta} - 2 \cdot d \cdot \sin \alpha \tan \beta \quad (3)$$

Los ángulos de incidencia,  $\alpha$ , y de refracción en el aceite,  $\beta$ , se relacionan mediante la ley de Snell:

$$1 \cdot \sin \alpha = n \cdot \sin \beta \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3) y teniendo en cuenta que  $(\sin \beta)^2 + (\cos \beta)^2 = 1$  queda:

$$\Delta r = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \beta \quad (5)$$

Finalmente, considerando los dos aspectos (a y b), la diferencia de camino óptico entre los rayos 1 y 2 resulta:

$$\Delta r_{12} = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \beta - \lambda/2 \quad (6)$$

La condición de interferencia constructiva (Intensidad máxima) se cumple cuando esta diferencia de camino óptico es un múltiplo par de la longitud de onda y la condición de interferencia destructiva (Intensidad mínima) se tiene cuando  $\Delta r_{12}$  es un múltiplo impar de ella. Por tanto:

$$\text{I. C: } \Delta r_{12} = 2m\lambda_{I,C} \rightarrow \lambda_{I,C} = \frac{4dncos\beta}{(2m+1)} \quad (7a)$$

$$\text{I. D: } \Delta r_{12} = (2m + 1)\lambda_{I,D} \rightarrow \lambda_{I,D} = \frac{2dncos\beta}{(m+1)} \quad (7b)$$

En ambas expresiones,  $m = 0, 1, 2, \dots$

Una primera cuestión por analizar en estas expresiones, muy importante, es el hecho de que el número de máximos (y de mínimos) que se pueden producir cuando se ilumina con luz blanca [que abarca longitudes de onda desde 400nm (violeta) hasta 700nm rojo]] depende fuertemente del tamaño que tenga el espesor de la lámina,  $d$ , en comparación con el valor de la longitud de onda,  $\lambda$ , de la luz que puede interferir. Si dicho espesor es del mismo orden de magnitud (o inferior) al del rango de valores de la longitud de onda de la luz, sólo se cumple la condición de interferencia constructiva en uno o a lo sumo dos valores de  $\lambda$  dentro del espectro de luces incidentes y, por tanto, se producirá un reforzamiento observable del color a que corresponda ese máximo. En cambio, si el espesor,  $d$ , es bastante mayor que las longitudes de onda de la luz incidente, la condición de interferencia constructiva se cumple para bastantes valores de  $\lambda$ , dando lugar a máximos de interferencia para todos ellos. Entonces, no se podrán discernir esos colores al mirar a la capa aceitosa.

Vamos a comprobar cuantitativamente esto, considerando, a modo de ejemplo, una lámina de aceite ( $n=1.45$ ), cuyo espesor sea algo menor que las longitudes de onda de la luz visible (300nm). Para una incidencia de la luz casi vertical ( $\cos\beta\approx 1$ ), se obtienen las siguientes longitudes de onda de máximos de interferencia:

$$m = 0 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 300 \cdot 1.45 = 1740\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

$$m = 1 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 300 \cdot 1.45 / 3 = 580\text{nm}$$

$$m = 2 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 300 \cdot 1.45 / 5 = 348\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

Es decir, se produce un único máximo dentro del espectro visible, que corresponde a una longitud de onda de 580nm, lo que visualmente implica color **verde amarillento**.



Supongamos ahora otra lámina del mismo aceite, a la que podamos considerar gruesa en comparación con el rango de longitudes de onda del espectro visible. Por ejemplo, de unos 1200nm. Obtenemos entonces las siguientes longitudes de onda de máximos de interferencia:

$$m = 0 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 = 6960\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

$$m = 1 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 3 = 2320\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

$$m = 2 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 5 = 1392\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

$$m = 3 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 7 = 828\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

$$m = 4 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 9 = 773\text{nm (fuera del espectro visible)}$$

$$m = 5 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 11 = 632\text{nm naranja}$$

$$m = 6 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 13 = 535\text{ amarillo}$$

$$m = 7 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 15 = 464\text{ azul}$$

$$m = 8 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 17 = 409\text{ violeta}$$

$$m = 9 \rightarrow \lambda = 4 \cdot 1200 \cdot 1.45 / 19 = \text{(fuera del espectro visible)}$$

Es decir, se producen 4 máximos que abarcan desde el naranja hasta el violeta y cuya superposición da lugar a una luz blanca grisácea.

Otra segunda cuestión para analizar es el hecho de que los colores que podemos ver reforzados cambian si lo hace el punto de observación. Podemos estudiar la observación desde, por ejemplo,  $\alpha=45^\circ$ . Utilizando la ley de Snell se obtiene  $\beta=29^\circ$ , y aplicando (7a) se obtiene  $\lambda_{I,C} = 506\text{nm}$ ,

correspondiente a un color **verde-azulado**, que contrasta con el color **verde-amarillento** obtenido en incidencia normal.

El tercer factor a analizar es la intervención de los índices de refracción. Si, por ejemplo, se sustituyera el agua del asfalto húmedo por otro medio de índice de refracción mayor que el del aceite usado, el rayo 2, al reflejarse ahí también experimentaría un desfase igual a  $\pi$ . Entonces habría un intercambio de papeles de las condiciones de I.C e I.D, (7a) y (7b), y se verían reforzados colores complementarios a los tratados en estos ejemplos.

Finalmente hemos de decir que el fenómeno real es lógicamente bastante más complejo que la situación simplificada que hemos analizado, ya que: La luz que ilumina a la capa aceitosa lo hace normalmente desde varias direcciones; las capas de aceite no son plano paralelas, sino que suelen tener un espesor variable; aunque el aceite es inmisible en el agua, se pueden formar pequeñas burbujas de ésta en su interior; el aceite "sucio" incorpora impurezas y, por tanto, no es perfectamente homogéneo; etc. Todos estos factores afectan al mosaico de colores que se observa al mirar a las manchas de aceite derramado y estirado por agua.

