

II.2 Interferencias

◆ Fundamento de las Interferencias:

Para explicar los fenómenos de interferencia debemos hacerlo a partir del hecho fundamental de que la luz es un movimiento ondulatorio, por lo que el efecto de un cierto número de trenes de ondas que llegan a un punto de una pantalla depende tanto de las *fases* de las ondas como de sus *amplitudes*.

Si dos o más trenes de ondas se cruzan en un punto determinado, se dice que *interfieren* en ése punto. Esto no se refiere a que un tren de ondas cualquiera sea perturbado por los otros, sino al efecto combinado de todos ellos en el punto en cuestión. El *principio de superposición* establece que la *elongación resultante* en cualquier punto y en cualquier instante, puede encontrarse *componiendo las elongaciones* que se producirían en el punto por los *trenes de ondas individuales*, si cada uno de ellos estuviera solo. Para el caso de las ondas electromagnéticas, el término elongación se refiere a la intensidad de los campos eléctrico o magnético.

El problema fundamental a considerar es el efecto en un punto de una pantalla, cuando las ondas luminosas llegan al mismo desde manantiales diferentes. Para simplificar, supondremos que tenemos *dos manantiales*. Si las ondas al abandonar estos manantiales están en fase, recorren trayectorias distintas y llegan juntas a la pantalla, pueden llegar en fase. Si ocurre así *se reforzarán* mutuamente.

Pero este refuerzo sólo puede durar un tiempo muy corto, pues uno de los manantiales puede experimentar un cambio brusco de fase y en tal caso los dos trenes de ondas no partirán en fase. Entonces, cuando lleguen a la pantalla *no se reforzarán*.

Una propiedad fundamental de los *átomos* o *moléculas* de un manantial luminoso, es que *no actúan coordinadamente* (*coherentemente*) sino que experimentan continuamente variaciones individuales. Esto se traduce en *cambios de fase frecuentes y fortuitos en la luz que emiten*.

Para producir *efectos de interferencia* que se puedan observar, *es necesario disponer de dos manantiales que emitan luces tales que, al partir, estén siempre en fase. Esto nunca puede realizarse con dos manantiales separados.*

Para asegurar la existencia de dos ondas luminosas procedentes de dos puntos siempre en fase, *es necesario partir de una sola onda luminosa y dividirla en dos partes*, cada una de las cuales siga una trayectoria distinta, alcanzando ambas finalmente el mismo punto de una pantalla. En estas condiciones, *cualquier cambio fortuito de fase que experimente la onda inicial, afecta a las dos partes por igual.* Dos puntos de esta clase se denominan *manantiales coherentes*.

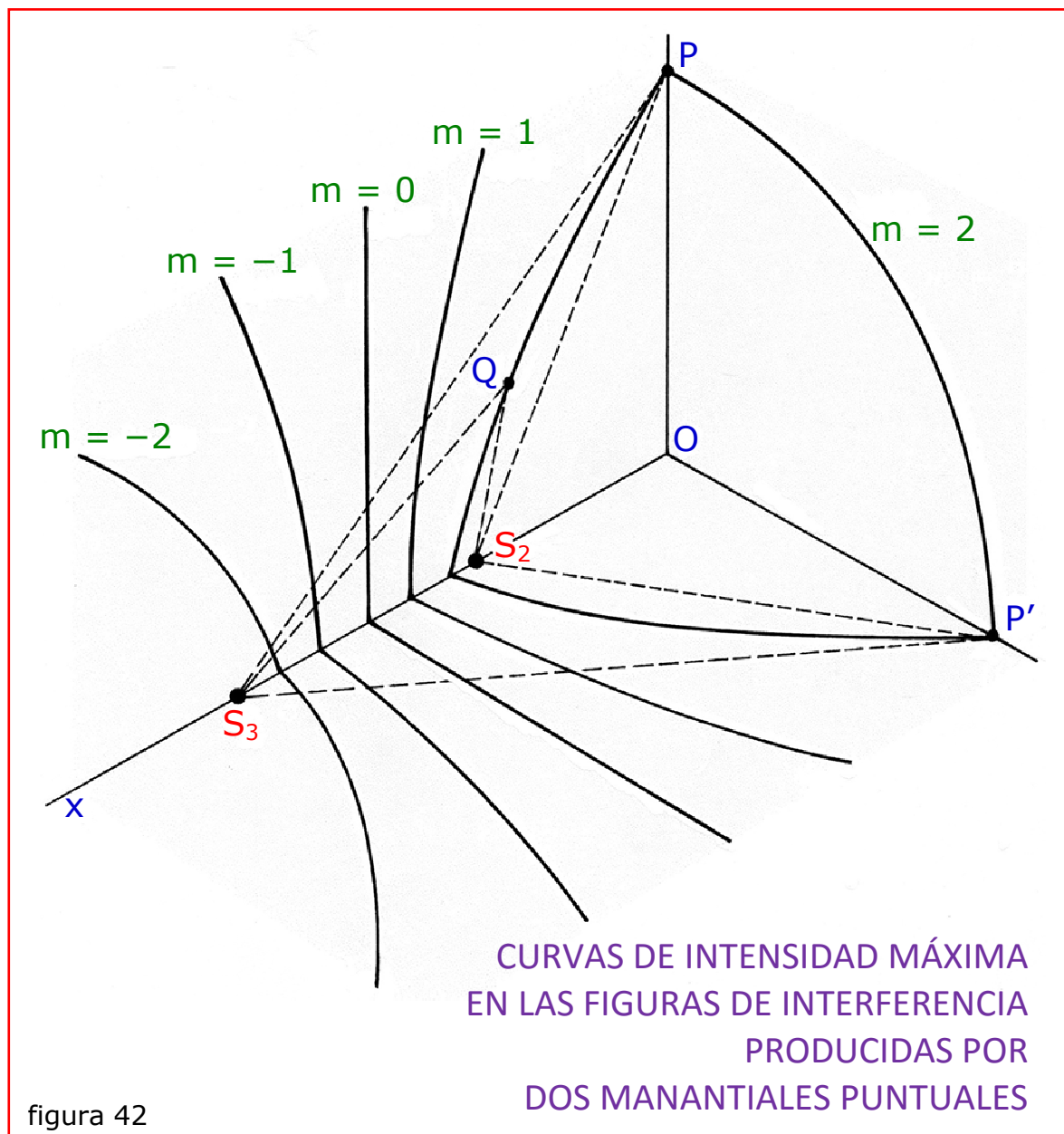
Los *efectos de interferencia* se observan con mayor facilidad cuando se combinan *ondas sinusoidales* de una sola *frecuencia f* y *longitud de onda λ* . En Óptica, las ondas sinusoidales son características de la *luz monocromática (luz de un solo color)*. Las lámparas incandescentes y las llamas emiten una *distribución continua de longitudes de ondas*. Sin embargo, existen varias formas de producir luz aproximadamente monocromática. Por ejemplo, ciertos filtros bloquean todas las longitudes de onda salvo un intervalo muy estrecho.

Con mucho, *la fuente que más se acerca a ser monocromática es el láser*. La característica distintiva de la *luz de un láser*, es que *la emisión de luz de muchos átomos está sincronizada en cuanto a frecuencia y fase*.

Cuando analicemos los efectos de interferencia y difracción en este capítulo y en el siguiente, supondremos que estamos trabajando con *ondas monocromáticas*.

◆ Manantiales Coherentes:

En la *figura 42*, S_2 y S_3 son dos *manantiales puntuales coherentes* sobre la recta Ox . P es un punto situado en un plano vertical para el cual la diferencia de recorridos $PS_3 - PS_2$ es igual a un cierto *número entero de longitudes de onda $m\lambda$* . O sea que las vibraciones en el punto P debidas a las dos ondas, estarán *en fase* y ambas *se reforzarán mutuamente*. Por otra parte, el reforzamiento también tendrá lugar en el punto P' situado en un plano horizontal, si $P'S_2 = PS_2$ y $P'S_3 = PS_3$. En tal caso, tendremos que en todos



los puntos de la circunferencia de centro O que pasa por P y P' , las ondas *se reforzarán*. Consecuentemente, sobre una pantalla perpendicular a la recta Ox y que pase por P y P' , aparecerá una *franja de interferencia circular brillante*. El punto Q de la *figura 42* es otro punto para el cual la diferencia de recorridos $QS_3 - QS_2$ es también $m\lambda$, siendo la curva que pasa por P y Q el lugar de tales puntos en el plano vertical. Esta curva es una *hipérbola* (la diferencia de distancias de un punto cualquiera de una hipérbola a dos puntos fijos es constante). Si imaginamos que esta hipérbola gira alrededor de la recta Ox como eje, engendra una *superficie* denominada *hiperboloide de revolución*. Las ondas

procedentes de S_2 y S_3 llegarán a todos los puntos de esta superficie de tal modo que se reforzarán mutuamente.

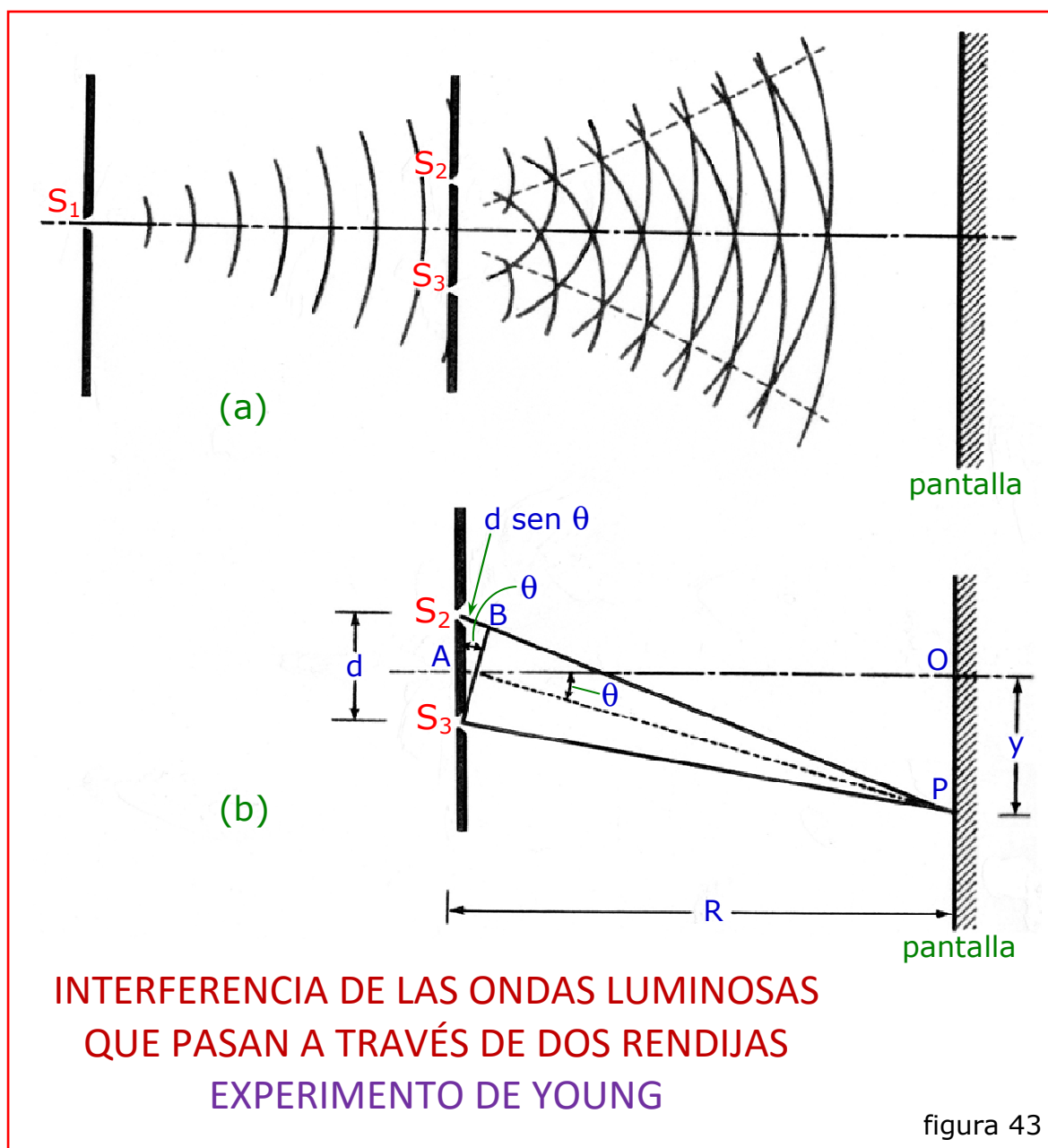
El diagrama de la *figura 42* se ha dibujado para el caso sencillo en que la distancia de S_2 a S_3 es 3λ , y en que $PS_3 - PS_2 = 2\lambda$ ($m=2$). La hipérbola $m=1$ es el lugar de los puntos situados en un plano vertical para los cuales la diferencia de recorridos es λ . El lugar de todos los puntos para los cuales la diferencia de recorridos es nula ($m=0$), es una recta que pasa por el punto medio del segmento S_2S_3 . Se han representado también las hipérbolas correspondientes a $m=-1$ y $m=-2$. La rotación de estas curvas alrededor de Ox origina en este caso 5 hiperboloides. Aparecerán franjas brillantes sobre una pantalla en cualquier posición, a lo largo de las curvas de intersección de los hiperboloides con la pantalla.

Si la distancia entre los manantiales es igual a muchas longitudes de onda, habrá un gran número de superficies sobre las cuales las ondas se reforzarán y se formará un gran número de franjas hiperbólicas casi rectas (brillantes y oscuras alternadamente) sobre una pantalla paralela a la recta que une los manantiales.

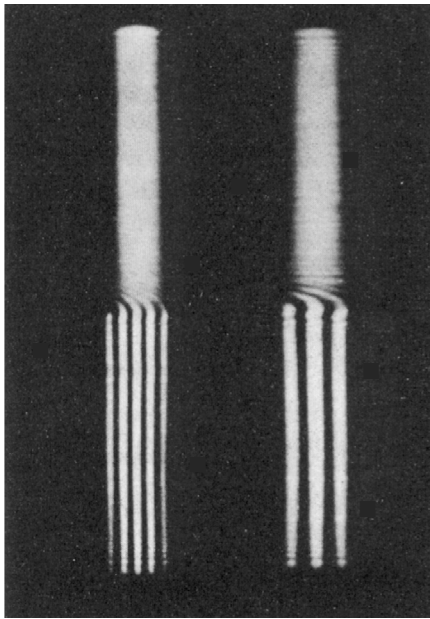
◆ Interferencia con Doble Rendija. Experimento de Young:

Uno de los primeros experimentos que demostraron que la luz puede producir interferencias, fue realizado por el físico inglés Thomas Young en 1800. El experimento resultó entonces decisivo, ya que añadió una prueba más a la creencia creciente de que la luz tenía naturaleza ondulatoria.

El aparato de Young está representado en la *figura 43(a)*. Un manantial luminoso (*no representado*) situado a la izquierda emite luz monocromática, pero ésta no es idónea para un experimento de interferencia, porque las emisiones de las diferentes partes de una fuente ordinaria no están sincronizadas. Para remediar esto se dirige la luz hacia una pantalla con una ranura o rendija estrecha S_1 , de aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de ancho. La luz que emerge de esta ranura proviene solamente de una región muy pequeña de la fuente luminosa; por lo tanto, la ranura S_1 se comporta en mayor medida como la fente ideal deseable. En las versiones modernas de este experimento, se utiliza un láser como fuente de luz coherente y la ranura S_1 no es necesaria. La luz que emana de la



rendija S_1 ilumina una pantalla con otras dos rendijas estrechas S_2 y S_3 , cada una de aproximadamente de $1 \mu\text{m}$ de ancho y separada de la otra unas pocas decenas o centenas de micrómetros. A partir de la ranura S_1 se propagan frentes de onda cilíndricos, los cuales alcanzan las ranuras S_2 y S_3 en fase porque recorren distancias iguales desde S_1 . Por consiguiente, las ondas que emergen de las ranuras S_2 y S_3 también están en fase, por lo que S_2 y S_3 son fuentes coherentes. La interferencia de las ondas procedentes de S_2 y S_3 crea un patrón en el espacio. Para visualizar este patrón, se coloca una pantalla a la



Las líneas finas de la parte inferior de cada imagen, son líneas de interferencia producidas por luz que pasa a través de dos rendijas. La distancia entre las rendijas es mayor en la imagen de la izquierda. La banda ancha de la parte superior es producida por una sola rendija.

figura 44

derecha de estas rendijas. Se observa así un cierto número de bandas brillantes y oscuras, paralelas a las rendijas, como se distingue en la parte inferior de la figura 44. Si se cubre una cualquiera de las rendijas S_2 o S_3 , desaparecen las líneas oscuras y la pantalla aparece iluminada en una ancha banda, como se observa en la parte superior de la figura 44. Evidentemente, una teoría corpuscular no podría explicar el hecho de que un punto sobre la pantalla sea brillante cuando se abre una sola rendija y se convierta en oscuro cuando están abiertas las dos.

En la figura 43(b), d es la distancia entre las rendijas y P un punto sobre la pantalla en una dirección que forma un ángulo θ con el eje del sistema. Con centro en P y radio PS_3 , trazamos el arco que corta a PS_2 en B . Si R es

muy grande comparado con d (como normalmente ocurre), este arco puede considerarse como un segmento rectilíneo perpendicular a PS_3 , PA y PS_2 (estas tres pueden considerarse prácticamente paralelas, por ser $R \gg d$). Entonces el triángulo BS_2S_3 es rectángulo semejante a POA y la distancia $S_2B = d \sen \theta$. Esta distancia es la diferencia de recorridos de las ondas que alcanzan P procedentes de ambas rendijas.

Estas ondas que parten forzosamente en fase desde S_2 y S_3 , no se encontrarán en fase en P a causa de esta diferencia de recorridos. De acuerdo con lo estudiado en el tema anterior, en P habrá un reforzamiento total (interferencia constructiva) y el punto se encontrará en el centro de una franja brillante, si la diferencia de recorridos $d \sen \theta$ es un cierto número entero de longitudes de onda $m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). Es decir:

$$d \sen \theta = m\lambda$$

$$\text{o sea } \Rightarrow \sen \theta = m\lambda/d$$

Ahora bien: λ es del orden de 5×10^{-5} cm y d no puede hacerse mucho menor

que 10^{-2} cm. Por otra parte, sólo de 5 a 10 franjas son lo bastante brillantes para ser visibles; de modo que $m=10$ como máximo. En consecuencia:

$$\text{sen } \theta \text{ (máximo)} = \frac{10 \times 5 \times 10^{-5} \text{ cm}}{10^{-2} \text{ cm}} = 0,05$$

que corresponde a un ángulo de sólo 3° .

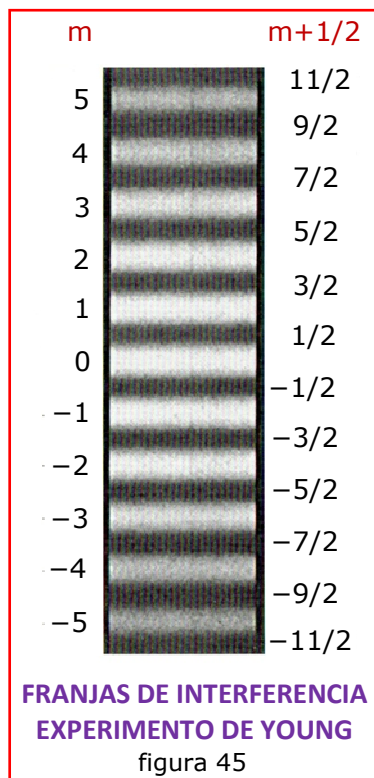
La franja brillante central en el punto O ($m=0$), corresponde a una diferencia de recorridos nula, o sea $\text{sen } \theta = 0$. Si el punto P se encuentra en el centro de la franja de orden m , la distancia y desde la franja de orden cero a la de orden m , es $y = R \text{tg } \theta$. Como θ es extremadamente pequeño para todos los valores de m , se puede escribir: $y = R \text{sen } \theta$

Luego:

$$y = R \frac{m\lambda}{d} \quad \text{de donde } \Rightarrow \quad \lambda = \frac{yd}{mR}$$

Este experimento nos permite medir directamente la longitud de onda de la luz utilizada. Consideremos dos rendijas distanciadas 0,2 mm, una pantalla situada a un metro de distancia y supongamos que la tercera franja brillante está desplazada 7,5 mm de la franja central. Entonces tendremos:

$$\lambda = \frac{yd}{mR} = \frac{0,75 \text{ cm} \times 0,02 \text{ cm}}{3 \times 100 \text{ cm}} = 5 \times 10^{-5} \text{ cm} = 500 \text{ nm}$$



En los puntos donde la diferencia de trayectos es un número semientero de longitudes de onda $(m+\frac{1}{2})\lambda$, hay cancelación total (interferencia destructiva) y por ello la formación de las franjas oscuras en la pantalla. Por lo tanto, las regiones oscuras de la pantalla se presentan cuando:

$$d \text{sen } \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$$

En la figura 45 se muestra una fotografía de las franjas de interferencia de Young, con indicación de los factores m y $m+\frac{1}{2}$ correspondientes.

La distancia entre bandas brillantes adyacentes es inversamente proporcional a la distancia d entre las ranuras. Cuanto más próximas están las ranuras una de otra, tanto más están separadas las franjas. Cuanto más separadas están las ranuras una de otra, tanto más están próximas las franjas.

◆ Interferómetro de Pohl:

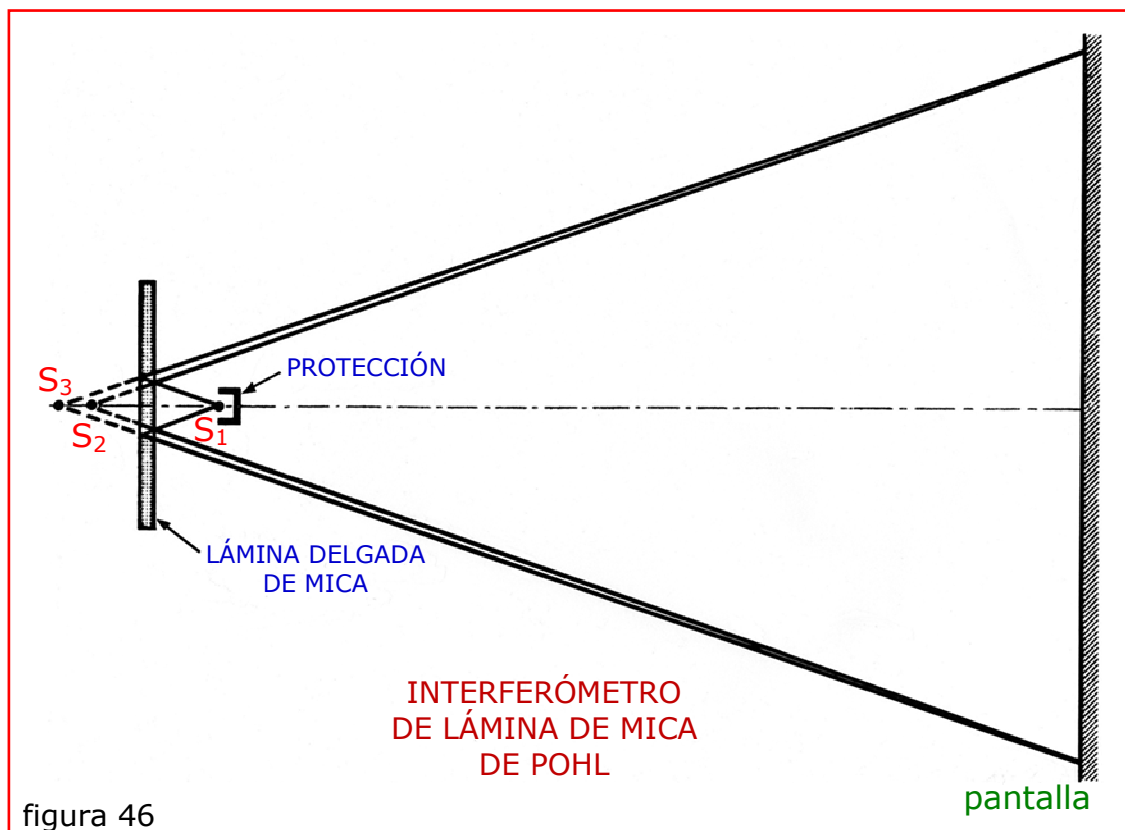
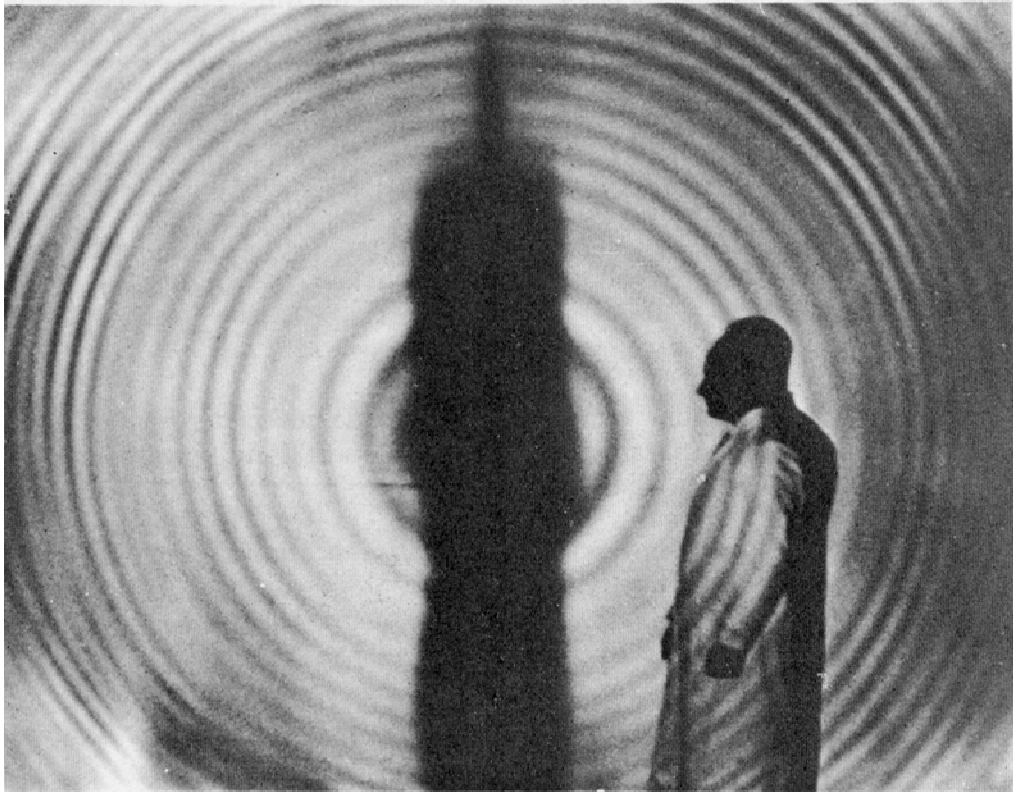


figura 46

Pueden producirse muy fácilmente franjas de interferencia circulares con ayuda del sencillo aparato sugerido por Robert Pohl. Se coloca una pequeña lámpara S_1 de arco de mercurio a una distancia de algunos centímetros de una lámina de mica de 0,05 mm de espesor, aproximadamente, como se indica en la figura 46. Una parte de luz se refleja en la primera superficie como si procediese de la imagen virtual S_2 . Otra parte de luz aproximadamente igual se refleja en la superficie posterior como si procediese de la imagen virtual S_3 . Las franjas de interferencia circulares formadas por la luz procedente de estos dos manantiales coherentes, pueden proyectarse sobre la pared de una habitación, como se observa en la figura 47.

◆ Cambios de Fase en la Reflexión. Espejo de Lloyd:

Cuando el índice de refracción de una superficie reflectante es mayor que el del medio de propagación, la reflexión de la luz presenta una propiedad muy



FRANJAS CIRCULARES DE INTERFERENCIA
PRODUCIDAS CON EL INTERFERÓMETRO DE MICA DE POHL
EL RECTÁNGULO OSCURO ES LA SOMBRA
DE LA ENVOLTURA DEL ARCO DE MERCURIO

figura 47

importante que puede verificarse con la ayuda del *interferómetro* llamado *espejo de Lloyd*, esquematizado en la *figura 48*.

En este dispositivo, los dos *manantiales coherentes* son la *rendija real* S_1 y su *imagen virtual* S_2 . Las franjas formadas por interferencia de estas dos ondas luminosas, pueden observarse sobre una pantalla colocada después del espejo. Si en lugar de proyectar las franjas sobre una pantalla, *observamos con un*

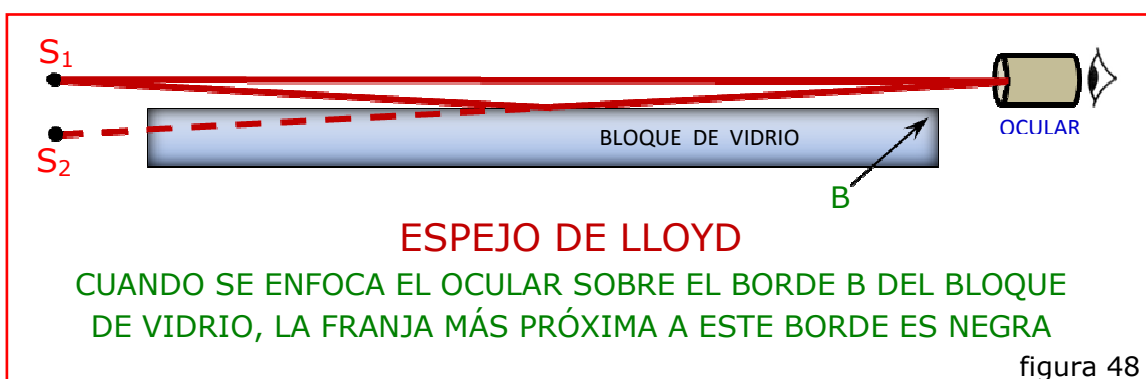
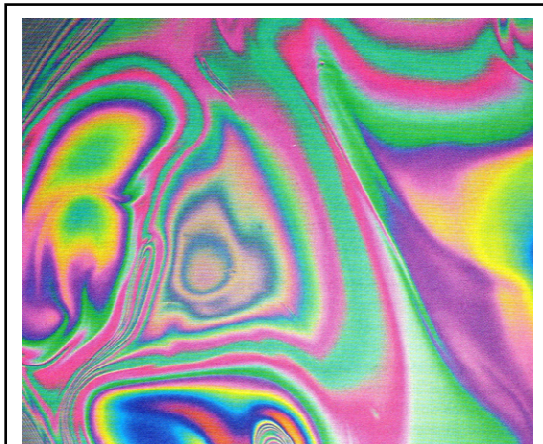


figura 48

ocular (*) las franjas formadas en el espacio en un plano que pase por el borde B , la más próxima al mismo aparece oscura. Siendo ésta la franja correspondiente a una diferencia de recorridos nula, debería normalmente ser brillante. Pero existe el hecho de que una de las ondas ha sido reflejada en el espejo y la otra procede directamente de S_1 , lo cual indica que la onda reflejada ha experimentado un salto de fase de 180° . Es decir, el tren de ondas ha ganado (o perdido) media longitud de onda en el proceso de la reflexión.

(*) Lente o sistema de lentes.

◆ Interferencias en Láminas Delgadas:



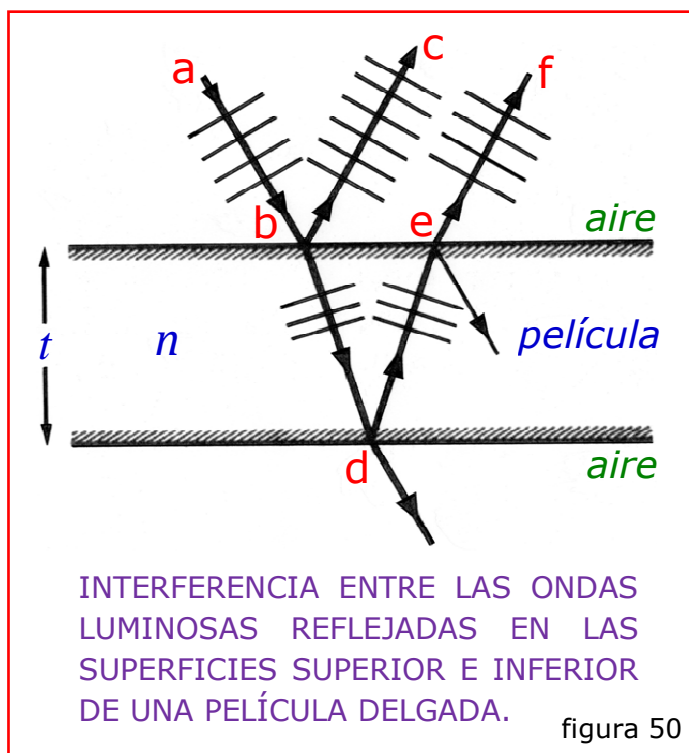
Los colores se deben a la interferencia entre las ondas luminosas que se reflejan en las superficies superior e inferior de una fina película de aceite que flota sobre agua. figura 49

Es frecuente observar bandas brillantes de colores cuando la luz se refleja en una burbuja de jabón o en una capa fina de aceite que flota sobre agua (ver la fotografía de la figura 49). Estos colores se producen por efectos de interferencia entre las dos ondas luminosas reflejadas en las caras opuestas de las láminas de disolución de jabón o de aceite.

En la figura 50, la línea ab es un rayo de un haz de luz monocromática que incide sobre la superficie superior de una película

delgada (las líneas normales a los rayos indican los frentes de onda). Una parte de la luz incidente se refleja en la primera superficie [rayo bc] y otra se transmite [rayo bd]. En la segunda superficie, una parte es nuevamente reflejada [rayo de] y de ésta a su vez emerge una parte [rayo ef] a través de la primera superficie. Si los haces que contienen a los rayos bc y ef tienen una anchura apreciable, los frentes de onda se superponen y pueden producir efectos de interferencia. Para simplificar, supongamos que la luz incide perpendicularmente a la superficie, siendo t el espesor de la película y n su índice de refracción. Si λ es

la longitud de onda de la luz en el aire, la longitud de onda en la película será λ/n (sabemos que $\lambda_a/\lambda_p = n_p/n_a$ y que $n_a = 1$) y el número de ondas contenidas



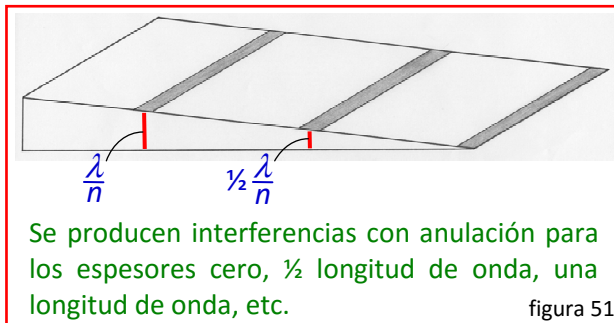
en el recorrido de ida y vuelta ($2t$) a través de la película, será $2t/(\lambda/n)$. Supongamos además que este último es un número entero. Cuando un frente de onda atraviesa la película y retrocede (como en la figura 50, pero perpendicular), se produce una reflexión en cada superficie de la película (superior e inferior). Si no existiesen otras consideraciones, las ondas reflejadas en las dos superficies estarían en condiciones de interferir sumando sus elongaciones,

o sea, reforzándose. Pero sabemos (*por espejo de Lloyd*) que cuando un tren de ondas se refleja en la superficie de un medio de índice superior que el de propagación, el tren de ondas reflejado pierde (o gana) media longitud de onda. En consecuencia, las ondas que se han propagado a través de la película y retroceden, están exactamente en oposición de fase con las ondas reflejadas en la superficie superior, y los frentes de onda interfieren, anulándose.

El párrafo anterior puede resumirse: si la longitud recorrida a través de la película contiene un número entero de ondas, no hay luz reflejada. Paralelamente, puede deducirse que: si la longitud recorrida contiene un número entero de ondas más media onda, habrá interferencia con refuerzo y, consecuentemente, una reflexión fuerte.

Si la película es muy delgada comparada con la longitud de onda de la luz, el recorrido a través de la película es despreciable y el único efecto evidente es la pérdida de media longitud de onda en la primera superficie. En tal caso, independientemente de la longitud de onda, las ondas reflejadas en las dos

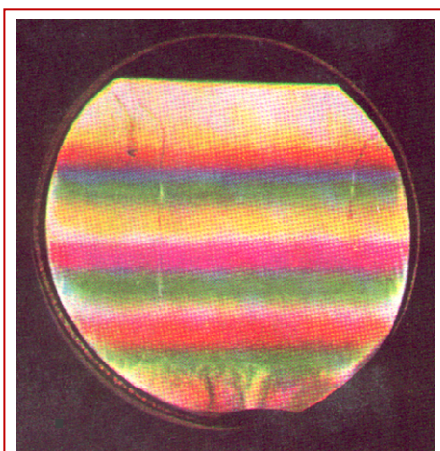
superficies estarán en oposición de fase y se anularán mutuamente. Por lo tanto, no se refleja luz y la película aparece negra para la luz reflejada.



Si la película tiene forma de cuña fina de ángulo pequeño, como la de la figura 51, y se efectúa la observación por reflexión con luz monocromática, aparece cruzada por franjas brillantes del color de la luz utilizada, separadas por franjas oscuras. En el vértice, la

lámina se verá oscura. A una distancia del vértice tal que el espesor de la lámina sea $\frac{1}{4}$ de longitud de onda (recorrido ida y vuelta: $\frac{1}{2}$ longitud de onda), se verá brillante. Donde el espesor de la lámina sea $\frac{1}{2}$ longitud de onda, se verá oscura. En síntesis, no hay reflexión (o es muy pequeña) cuando la película tiene un espesor cero, $\frac{1}{2}$ (λ/n), $\frac{2}{2}$ (λ/n), $\frac{3}{2}$ (λ/n), etc., y hay reflexión intensa cuando la película tiene un espesor $\frac{1}{4}$ (λ/n), $\frac{3}{4}$ (λ/n), $\frac{5}{4}$ (λ/n), etc.

Si la lámina anterior se ilumina primero con luz azul y luego con luz roja, el espaciado de las bandas rojas es mayor que el de las azules, debido a la mayor longitud de onda de la luz roja. Las franjas producidas por las longitudes de onda intermedias ocuparán posiciones también intermedias. Si la lámina se ilumina con luz blanca, su color en cualquier punto es debido a la mezcla de aquellos colores que pueden reflejarse en dicho punto, mientras que los colores para los cuales la interferencia provoca anulación estarán ausentes. En la luz transmitida predominarán los colores que están ausentes en la luz reflejada y por lo tanto, en cualquier punto, el color de la lámina por luz reflejada es complementario de su color por luz transmitida.



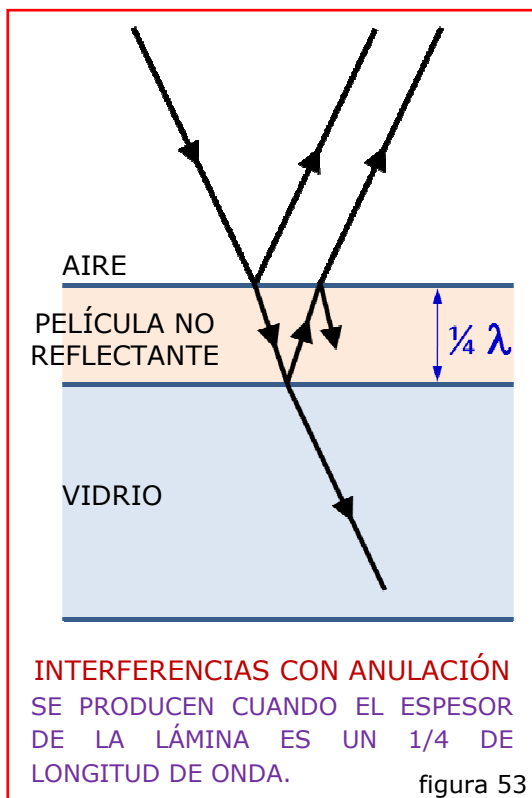
Fotografía de la luz reflejada por una lámina delgada de una disolución de jabón.

figura 52

La figura 52 reproduce una fotografía de la luz reflejada por una lámina delgada de una disolución de jabón. Esta lámina se ha formado sobre un anillo de vidrio y está montada en un plano vertical. Por escurrimiento del líquido hacia abajo, el espesor de la lámina aumenta de la parte superior a la inferior. La parte negra superior indica que el espesor en esta región es inferior a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz.

◆ Películas no Reflectantes:

Los fenómenos de interferencias en láminas delgadas, se utilizan en la producción de vidrios no reflectantes. Para ello, una delgada capa o película de material transparente se deposita sobre la superficie del vidrio, como se indica



en la figura 53. Si el índice de este material se escoge adecuadamente, con un valor intermedio entre el del aire y el del vidrio, se reflejarán cantidades iguales de luz en la superficie exterior y en la superficie límite entre la película y el vidrio. Además, como ambas reflexiones se producen en un medio de mayor índice que el de propagación, tiene lugar el mismo cambio de fase en cada reflexión. Finalmente, si el espesor de la lámina es de $\frac{1}{4}$ longitud de onda (suponiendo incidencia normal), las ondas reflejadas en ambas superficies estarán desfasadas 180° y se producirá una interferencia con anulación total.

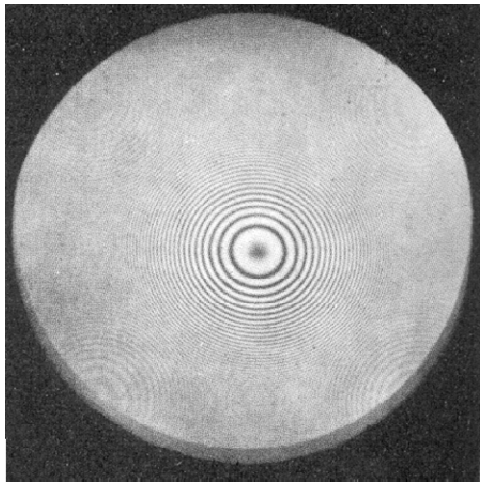
Obviamente, el espesor sólo puede ser igual a $\frac{1}{4}$ de longitud de onda para una longitud de onda determinada, que se elige corrientemente en la región amarillo-verde del espectro, para la cual el ojo es más sensible. Tiene entonces lugar alguna reflexión para las longitudes de onda mayores y menores. La reflexión de una lente puede reducirse de este modo a valores menores que el 1 %.

◆ Anillos de Newton:



Si la superficie convexa de una lente se pone en contacto con una superficie plana de vidrio, como indica la figura 54, se forma entre las dos superficies una delgada lámina de aire. El espesor de esta lámina es muy pequeño en el

punto de contacto y aumenta gradualmente hacia afuera. Los lugares de los puntos de igual espesor son círculos concéntricos cuyo centro es el punto de contacto. Se encuentra que dicha lámina produce colores de interferencia, originados del mismo modo que los colores de una película de jabón. Las franjas de interferencia son circulares y su centro es el punto de contacto.

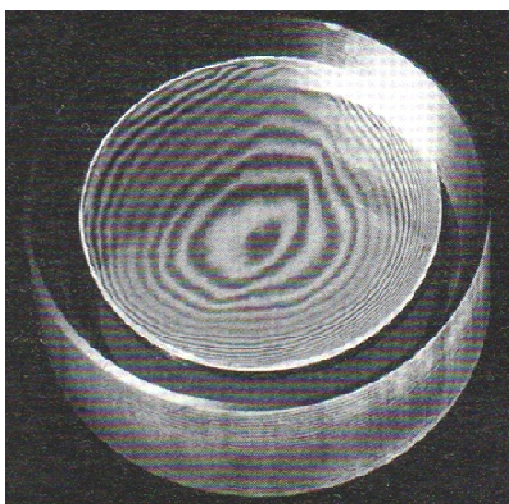


Anillos de Newton formados por interferencia en la delgada lámina de aire comprendida entre una superficie convexa y una plana.

figura 55

Cuando se mira con luz reflejada, el centro es negro como si fuera una fina lámina de jabón. En este caso no hay inversión de fase de la luz reflejada en la superficie superior de la lámina (*que tiene un índice inferior al del medio en cual se está propagando la luz antes de la reflexión*), mientras que se invierte la fase de la onda reflejada en la superficie inferior. Cuando se mira con luz transmitida, el centro de la figura es brillante. Si se utiliza luz blanca, el color de la luz reflejada por la película en cualquier punto es complementario del color trans-

mitido. La figura 55 es una fotografía de los anillos de Newton formados por la lámina de aire comprendida entre una superficie plana y otra convexa.



Comprobación del objetivo de un antejo durante su construcción.

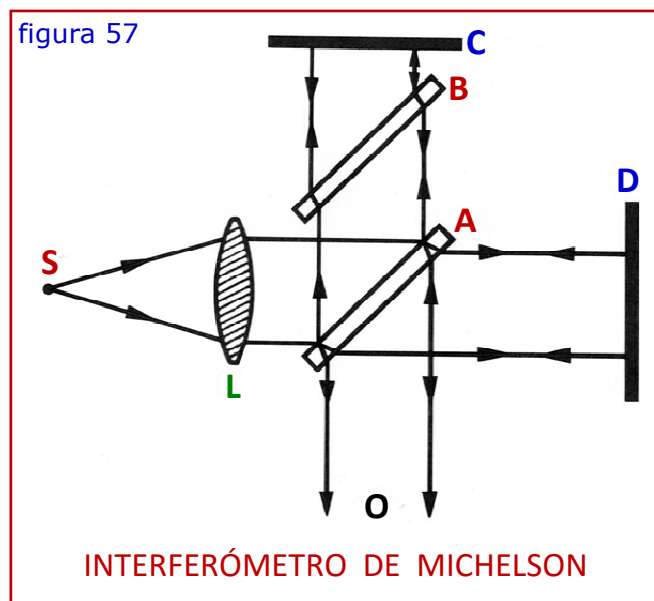
figura 56

La superficie de una pieza óptica que se quiere tallar con una curvatura deseada, puede compararse con la de otra superficie que se sabe es correcta, poniendo ambas en contacto y observando las franjas de interferencia.

La figura 56 muestra una fotografía realizada durante la fabricación de un objetivo de antejo. El disco grueso inferior de mayor diámetro es la plantilla. El disco superior más pequeño es el objetivo que se está comprobando. Las curvas de nivel son franjas de interferencia de Newton y cada una de ellas indica una discrepancia tal entre el objetivo y la plantilla, que determina que el ejemplar sea muy deficiente.

• Interferómetro de Michelson:

Un importante dispositivo experimental que utiliza los fenómenos de interferencia para realizar mediciones de longitud con precisión, es el Interferómetro de Michelson, representado en la figura 57.



La luz procedente de una fente monocromática S se hace paralela por medio de una lente L e incide sobre una lámina de vidrio A, inclinada 45° respecto a la dirección del haz incidente. La superficie frontal de esta lámina está semiplateada, o sea recubierta de una capa extremadamente delgada de plata, de modo tal que la mitad del haz se refleja y la otra mitad atraviesa la lámina. Los haces reflejado y transmitido inciden sobre

los espejos planos C y D, respectivamente, y vuelven hacia la lámina. En la superficie semiplateada, una fracción del haz procedente de C es transmitida y una fracción del haz procedente de D es reflejada. Puesto que ambos proceden del mismo haz que incidió inicialmente sobre A, son capaces de producir efectos de interferencia.

La luz reflejada en C pasa una vez a través de la lámina A, mientras que la procedente de D la atraviesa tres veces. Para que cada haz recorra la misma distancia en el vidrio, se intercala otra lámina B de vidrio del mismo espesor que A en el trayecto del haz superior, lo que asegura que cada haz pasa a través del mismo espesor de vidrio.

Un observador O mira la superficie del espejo C a través de la lámina semiplateada A y ve la superficie del espejo D reflejada en A. Si las distancias de A a ambos espejos son idénticas y C y D perpendiculares entre sí, formando un ángulo de 45° con A, la imagen de D coincide con la superficie de C. Si estas condiciones no se cumplen exactamente, existe de hecho una delgada lámina de aire

entre la superficie de *C* y la imagen de *D*, por lo que se observarán franjas de interferencia en dicha lámina.

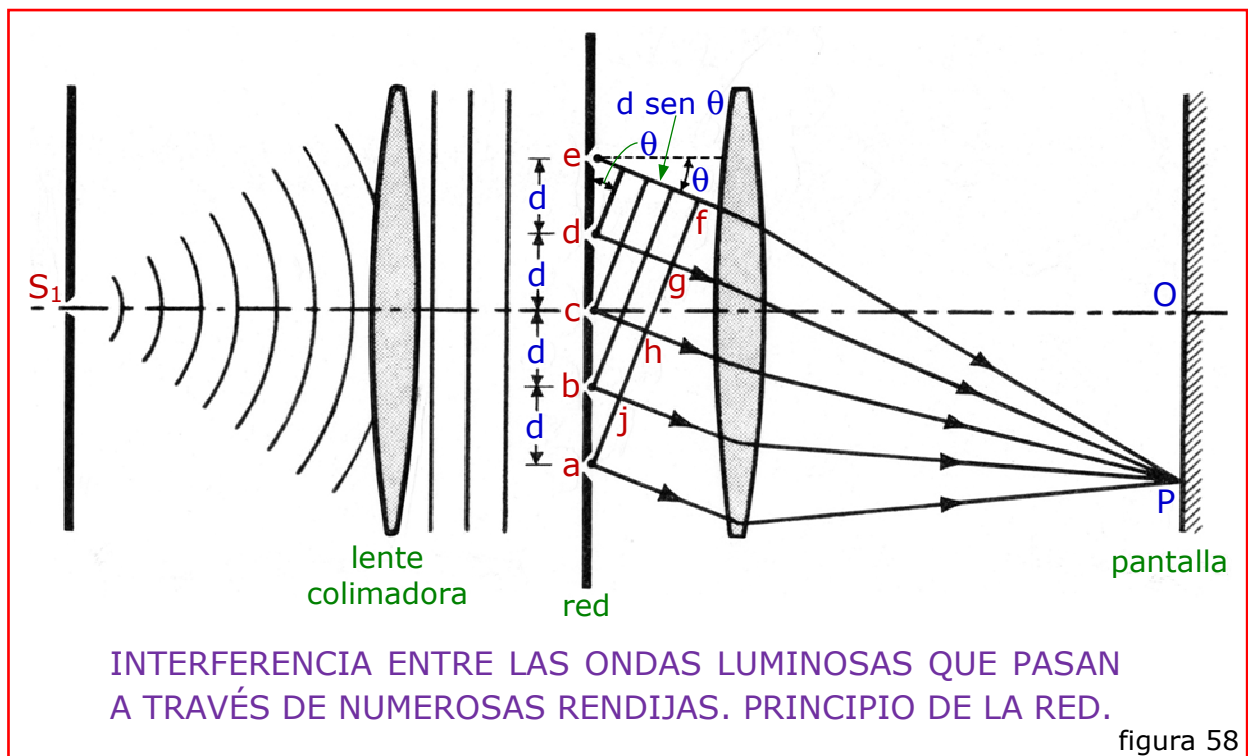
El espejo *C* está fijo y el espejo *D* va montado sobre un tornillo micrométrico de precisión, de modo que pueda moverse perpendicularmente a su superficie. Cuando se desplaza *D*, el sistema de franjas se mueve lateralmente a través del campo visual. Un desplazamiento del espejo de media longitud de onda, hace que cada franja pase de su posición inicial a la ocupada anteriormente por la franja próxima. Contando el número de franjas que pasa por un punto fijo de referencia, puede medirse la distancia recorrida por el espejo con un error igual a una pequeña fracción de la longitud de onda utilizada.

Tratando de buscar un patrón permanente de longitud, de tal modo que pudiera reproducirse el metro patrón si fuera destruido alguna vez, Michelson, utilizando su aparato, comparó el metro patrón con la longitud de onda de la luz roja emitida por el vapor de cadmio, y obtuvo el valor siguiente: $1\text{ m} = 1.553.164,13$ longitudes de onda. O sea que la longitud de esta onda es: $\lambda = 643,84696\text{ nm}$ (error $< 10^{-6}$).

Las posiciones de las franjas se observan a través de un telescopio con un ocular con retículo. Si *m* franjas cruzan el retículo al mover el espejo una distancia *y*, entonces: $y = m\lambda/2$ o $\lambda = 2y/m$.

◆ Interferencia con muchas Rendijas:

Este dispositivo, denominado red, consiste en un gran número de rendijas estrechas muy próximas y equidistantes. Las ondas luminosas que se propagan desde las rendijas interfieren entre sí, del mismo modo que las ondas procedentes de las dos rendijas del experimento de Young. Las primeras redes fueron construidas por Fraunhofer en 1821 y consistían en un cierto número de hilos tensos en un marco y separados entre sí por distancias de algunas centésimas o décimas de milímetro. Actualmente se construyen las redes grabando con un diamante muchos surcos igualmente espaciados sobre una superficie de vidrio o metal, o por reducción fotográfica de un patrón de tiras blancas y negras sobre papel, utilizándose más bien como redes de reflexión que de transmisión. La distancia entre las rayas es del orden de algunas milésimas de milímetro y cada red tiene unas 50.000 rayas. La teoría y aplicaciones de la red las veremos con más detalle en el capítulo sobre Difracción y por ahora sólo haremos un estudio previo, utilizando el mismo método que en el experimento de Young con doble rendija.



En la *figura 58*, una rendija S_1 es iluminada desde la izquierda por *luz monocromática*. Como deseamos tener ondas secundarias que partan en fase de todas las rendijas de *la red*, se intercala entre ésta y S_1 una *lente colimadora*, de tal modo que la rendija se encuentre en su *plano focal objeto*. Los frentes de onda que salen entonces de la lente son planos perpendiculares al eje del sistema.

La rendija está seguida de una *segunda lente* con una pantalla o película fotográfica en su *plano focal imagen*. Puesto que una lente hace que los rayos paralelos converjan en este plano focal, la lente forma sobre la pantalla una *imagen reducida* de la figura que aparecería sobre una *pantalla colocada en el infinito*.

Las *ondas secundarias* que divergen desde las rendijas de la red *parten en fase*, pero *recorren trayectorias distintas* antes de alcanzar el punto P. Consideremos aquellas *fracciones de las ondas secundarias* que abandonan la red en una *dirección arbitraria* formando un *ángulo* θ con el eje del sistema. Tracemos la línea *af* perpendicular a esa dirección. De acuerdo a lo estudiado en óptica geométrica, sabemos que el número de ondas es el mismo para todos los rayos desde un plano que pasa por *af* hasta el punto imagen P. Por consiguiente, las *diferencias de fase* de las *ondas secundarias* permanecen *invariables* después de atravesar este plano y basta sólo considerar sus

diferencias de fase relativas en a , j , h , g y f , donde los rayos procedentes de las rendijas cortan a la línea af .

De la figura se deduce que $bj = d \sen \theta$, $ch = 2 d \sen \theta$, etc. Si el ángulo θ tiene un valor tal que $bj = 1 \text{ longitud de onda}$, entonces será $ch = 2 \text{ longitudes de onda}$, etc. Para éste ángulo particular, las diferencias de fase entre las ondas secundarias que llegan a P son 2π , 4π , etc., de modo que *todas las amplitudes se suman* y la pantalla resulta brillante a lo largo de una franja que pasa por P , paralela a las rendijas. O sea que, *P se encuentra sobre una franja brillante si:*

$$\sen \theta = \lambda/d, 2\lambda/d, 3\lambda/d, \text{ etc.}$$

Vemos que estos ángulos son exactamente idénticos a aquellos para los cuales aparecen franjas brillantes en la figura de interferencia originada por dos rendijas. ¿En qué *difiere* entonces la *figura de interferencia* producida por un *gran número de rendijas* de la que resulta en el caso de *dos rendijas*? La diferencia no estriba en las posiciones de los máximos, sino en la distribución de la luz sobre la pantalla entre los máximos. En el capítulo siguiente sobre Difracción, veremos que al *augmentar el número de rendijas los máximos se hacen mucho más brillantes y estrechos*.

Con sólo dos rendijas, el brillo disminuye gradualmente desde un máximo hasta anularse en un mínimo, mientras que *con muchas rendijas cae prácticamente a cero dentro de un ángulo extremadamente pequeño a ambos lados del máximo* y se conserva muy próximo a este valor hasta alcanzar el máximo siguiente. El aumento de nitidez de la franja permite determinar el ángulo θ con mucha mayor precisión, haciendo posible así una medida más exacta de la longitud de onda.



////

Ejercicio N° 1: Dos rendijas están separadas 0,3 mm y colocadas a 50 cm de una pantalla. ¿Cuál es la distancia entre la segunda y la tercera líneas oscuras de la figura de interferencia cuando se iluminan las rendijas con una luz de longitud de onda igual a 600 nm?

$$\lambda = \frac{y d}{m R} \quad \Rightarrow \quad y = \frac{\lambda m R}{d} \quad (\text{ver pág. 83})$$

y : desplazamiento de una franja brillante con respecto a la franja central ($m=0$).

$\lambda = 600 \text{ nm}$: longitud de onda de la luz utilizada.

$m_3 = 3$; $m_2 = 2$: número de orden de la franja brillante (0, 1, 2, ...).

$R = 50 \text{ cm}$: distancia de las rendijas a la pantalla.

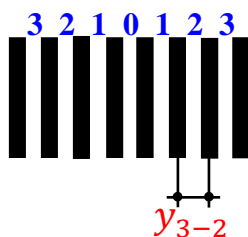
$d = 0,3 \text{ mm}$: distancia entre las rendijas.

Nota: la distancia entre franjas brillantes es igual que entre franjas oscuras.

$$y_3 = \frac{6 \times 10^{-5} \text{ cm} \times 3 \times 50 \text{ cm}}{0,03 \text{ cm}} = 0,3 \text{ cm}$$

$$y_2 = \frac{6 \times 10^{-5} \text{ cm} \times 2 \times 50 \text{ cm}}{0,03 \text{ cm}} = 0,2 \text{ cm}$$

$$y_{3-2} = 0,3 \text{ cm} - 0,2 \text{ cm} = 1 \text{ mm}$$



Normalmente, sólo de 5 a 10 franjas son lo bastante brillantes para ser visibles.

Ejercicio N° 2: Calcular la separación entre dos rendijas, teniendo en cuenta que cuando se iluminan con luz de longitud de onda igual a 600 nm y la figura de interferencia se proyecta sobre una pantalla colocada a 60 cm de distancia, la tercera franja brillante está desplazada 5,4 mm de la franja central.

$$\lambda = 600 \text{ nm} = 600 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$y = 5,4 \text{ mm} = 5,4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$$

$$m = 3$$

$$d = \frac{\lambda m R}{y} = \frac{600 \times 10^{-9} \text{ m} \times 3 \times 0,6 \text{ m}}{5,4 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$d = 0,2 \text{ mm}$$

Ejercicio N° 3: Dos rendijas distanciadas 0,3 mm se iluminan con una luz de longitud de onda igual a 500 nm y la figura de interferencia se proyecta sobre una pantalla. Si la segunda franja brillante está desplazada 3 mm de la franja central, ¿a qué distancia se encuentra la pantalla?

$$\lambda = 500 \text{ nm} = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$y = 3 \text{ mm} = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 0,3 \text{ mm} = 0,3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$m = 2$$

$$R = \frac{y d}{m \lambda} = \frac{3 \times 10^{-3} \text{ m} \times 0,3 \times 10^{-3} \text{ m}}{2 \times 500 \times 10^{-9} \text{ m}} = 0,9 \text{ m}$$

$$R = 0,9 \text{ m}$$

Ejercicio N° 4: En una doble rendija, la separación entre rendijas es de 0,2 mm y su distancia a una pantalla es de 1 m. En esta última se observan dos patrones de interferencia, uno debido a una luz de 480 nm y otro debido a una luz de 600 nm. ¿Cuál es la separación lineal, medida en la pantalla, entre las franjas de interferencia de tercer orden de los dos patrones?

$$\lambda_1 = 480 \text{ nm} = 480 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 600 \text{ nm} = 600 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$m = 3$$

$$R = 1 \text{ m}$$

$$d = 0,2 \text{ mm} = 0,2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$y_{31} = \frac{\lambda_1 m R}{d} = \frac{480 \times 10^{-9} \text{ m} \times 3 \times 1 \text{ m}}{0,2 \times 10^{-3} \text{ m}} = 7,2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$y_{32} = \frac{\lambda_2 m R}{d} = \frac{600 \times 10^{-9} \text{ m} \times 3 \times 1 \text{ m}}{0,2 \times 10^{-3} \text{ m}} = 9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$y_{32} - y_{31} = 9 \text{ mm} - 7,2 \text{ mm} = 1,8 \text{ mm}$$

Ejercicio Nº 5: Una luz de longitud de onda igual a 500 nm incide perpendicularmente sobre una lámina de 10^{-4} cm de espesor e índice de refracción 1,375. Parte de la luz entra en la lámina y se refleja en la segunda superficie. a) ¿Cuántas ondas hay contenidas a lo largo de la trayectoria de esta luz reflejada en la lámina? b) ¿Cuál es la diferencia de fase entre estas ondas cuando salen de la lámina y cuando entran en ella?

$$a) \quad \frac{\lambda_a}{\lambda_p} = \frac{n_p}{n_a} \Rightarrow \lambda_p = \frac{\lambda_a}{n_p} \quad * \quad N = \frac{2t}{\frac{\lambda_a}{n_p}} = \frac{2t n_p}{\lambda_a} \quad (\text{ver págs. 86/7})$$

λ_a : longitud de onda de la luz en el aire.

λ_p : longitud de onda de la luz en la película.

$n_a = 1$: índice de refracción del aire.

$n_p = 1,375$: índice de refracción de la película.

$t = 10^{-4}$ cm : espesor de la película.

$2t$: recorrido ida y vuelta de la onda a través de la película.

N : número de ondas contenidas en el recorrido ida y vuelta a través de la película.

$$N = \frac{2t n_p}{\lambda_a} = \frac{2 \times 10^{-4} \text{ cm} \times 1,375}{5 \times 10^{-5} \text{ cm}} = 5,5 \text{ ondas}$$

b) La onda reflejada en la primera superficie gana o pierde $\frac{1}{2}$ longitud de onda (por ser $n_p > n_a$). La onda reflejada en la segunda superficie, al salir difiere $\frac{1}{2}$ longitud de onda. En consecuencia, ambas ondas estarán en fase y habrá interferencia con refuerzo intenso (suma de las elongaciones).

Recordar $\left\{ \begin{array}{l} \text{Para } N = \text{entero} \Rightarrow \text{no hay luz reflejada} \\ \text{Para } N = \text{entero} + 1/2 \text{ onda} \Rightarrow \text{hay reflexión fuerte} \end{array} \right.$

Ejercicio Nº 6: ¿Cuál es la más fina película de índice de refracción 1,4 en la cual puede haber interferencia por reflexión para la componente violeta (400 nm) de un haz incidente de luz blanca? ¿Cuál es entonces el color residual del haz?

Debe ser: $N = 0,5 \text{ ondas}$

$$t = \frac{N \lambda_a}{2 n_p} = \frac{0,5 \times 4 \times 10^{-5} \text{ cm}}{2 \times 1,4} = 0,71 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

Como hay reflexión fuerte de la componente violeta, el color residual del haz tendrá un matiz de ése color.

Ejercicio Nº 7: a) Determinar el espesor de una lámina de jabón ($n = 1,33$) para una intensa reflexión de primer orden de la luz amarilla ($\lambda = 600 \text{ nm}$ en el vacío); suponer incidencia normal. b) ¿Cuál es la longitud de onda de la luz en la lámina?

(para obtener una intensa reflexión de primer orden, debe ser $N = 0,5$ ondas)

a)

$$t = \frac{N \lambda_a}{2 n_p} = \frac{0,5 \times 600 \text{ nm}}{2 \times 1,33} = 113 \text{ nm}$$

b)

$$\lambda_p = \frac{\lambda_a}{n_p} = \frac{600 \text{ nm}}{1,33} = 451 \text{ nm}$$

Ejercicio Nº 8: Una lámina de vidrio de $0,4 \mu\text{m}$ de espesor se ilumina con un haz de luz blanca normal a la lámina. El índice de refracción del vidrio es $1,5$. ¿Qué longitudes de onda del espectro visible ($\lambda = 400$ a 700 nm) aparecerán intensificadas en el haz reflejado?

$$\lambda_a = \frac{2 t n_p}{N} = \frac{2 \times 0,4 \times 10^{-6} \text{ m} \times 1,5}{N} = \frac{1,2 \times 10^{-6} \text{ m}}{N}$$

Habrá interferencia con refuerzo cuando $N = \frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, 3\frac{1}{2}, \dots$

$$N = 0,5 \Rightarrow \lambda_a = 2,4 \times 10^{-6} \text{ m} = 2.400 \text{ nm} (*)$$

$$N = 1,5 \Rightarrow \lambda_a = 0,8 \times 10^{-6} \text{ m} = 800 \text{ nm} (*)$$

$$N = 2,5 \Rightarrow \lambda_a = 0,48 \times 10^{-6} \text{ m} = 480 \text{ nm}$$

$$N = 3,5 \Rightarrow \lambda_a = 0,34 \times 10^{-6} \text{ m} = 340 \text{ nm} (*)$$

(*) fuera del espectro

Ejercicio Nº 9: Dos piezas rectangulares planas de vidrio descansan una sobre otra en una mesa. Entre ellas y en un borde se coloca una tira delgada de papel, de modo que quede entre las mismas una fina cuña de aire. Las láminas se iluminan normalmente por un haz de luz de sodio ($589,3 \text{ nm}$), observándose franjas de interferencia brillantes y oscuras, de las cuales hay 10 de cada clase en una longitud de un centímetro, medida perpendicularmente a los bordes en contacto. Calcular el ángulo de la cuña.

Se produce interferencia con anulación para los siguientes espesores (ver pág. 88):

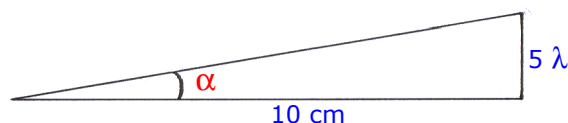
///

/// $0, \frac{1}{2} (\lambda_0/n_c), 1 (\lambda_0/n_c), 1\frac{1}{2} (\lambda_0/n_c), 2 (\lambda_0/n_c), \dots$ ($n_c = n_a = 1$)



O sea que habrá dos franjas oscuras por cada longitud de onda de la ordenada. Es decir, a 10 franjas le corresponderán 5 longitudes de onda.

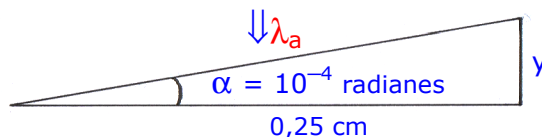
$$tg \alpha = \frac{5 \times 589,3 \times 10^{-9} m}{10^{-2} m} = 2,95 \times 10^{-4}$$



$$\alpha = 2,95 \times 10^{-4} \text{ radianes}$$

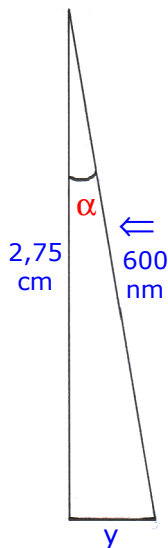
Ejercicio N° 10: Sobre una delgada película en forma de cuña, de plástico transparente cuyo índice de refracción es 1,4, incide normalmente luz monocromática. El ángulo de la cuña es 10^{-4} radianes. Se observan franjas de interferencia con una separación de 0,25 cm entre dos franjas brillantes contiguas. Calcular la longitud de onda (en el aire) de la luz incidente.

$$y = 0,25 \text{ cm} \times tg \alpha = 2,5 \times 10^{-5} \text{ cm}$$



$$0,5 \lambda_c = 2,5 \times 10^{-5} \text{ cm} \Rightarrow \lambda_c = 5 \times 10^{-5} \text{ cm} = 500 \text{ nm}$$

$$\lambda_a = 500 \text{ nm} \times 1,4 = 700 \text{ nm}$$



Ejercicio N° 11: Se ilumina normalmente con luz roja de longitud de onda 600 nm (en el vacío) una lámina vertical de jabón, en forma de cuña, de 2,75 cm x 2,75 cm (índice 1,33). Se observa que el borde superior de la lámina es negro cuando se mira con luz reflejada. La lámina aparece atravesada por seis franjas brillantes horizontales, coincidiendo el centro de la sexta con el borde inferior de la lámina. Calcular el ángulo de la cuña.

$$y = \frac{5,5 \times \frac{1}{2} \lambda_a}{n_c} = \frac{5,5 \times 0,5 \times 6 \times 10^{-5} \text{ cm}}{1,33} = 12,406 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

Nota: Se toman 5,5 franjas porque la sexta es media franja.

///

///

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{12,406 \times 10^{-5} \text{ cm}}{2,75 \text{ cm}} = 4,51 \times 10^{-5}$$

$$\alpha = 4,51 \times 10^{-5} \text{ radianes}$$

