5. Tejido fino en disposición cerrada con paso de luz irregular.

Contenido

5.1. Un montaje «abierto» o «cerrado». 1

5.2. Disposición básica 2

5.3. Puesta en marcha 4

5.4. ¿Cómo interpretarlo? 7

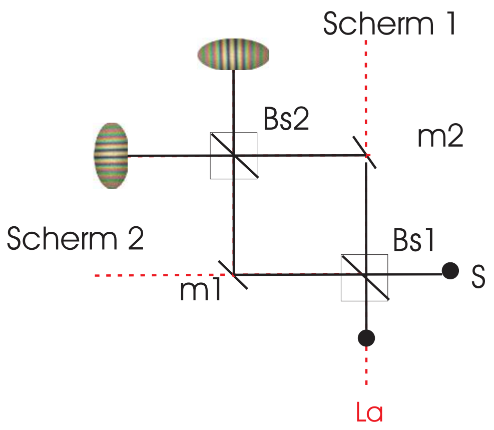
5.5. La elaboración matemática 9

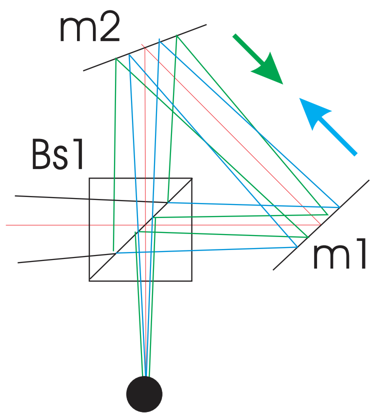
5.6. La elaboración algebraica 11

En lo que sigue, queremos construir efectivamente una especie de interferómetro. Queremos comprobar si aparece una imagen de interferencia y qué veremos si introducimos la mano en la trayectoria de la luz.

5.1. Un montaje «abierto» o «cerrado».

En lo que precede hemos hablado de una disposición «abierta» y otra «cerrada». El dibujo de la izquierda muestra una disposición abierta. Las dos trayectorias luminosas -S, Bs1, m1, Bs2 y S, Bs1, m2,Bs2- siguen cada una una trayectoria diferente. No es fácil hacer que las dos trayectorias de luz tengan la misma longitud hasta una parte de un milímetro. Ese problema no se presentó en la disposición de la que vemos un detalle a la derecha. No importa si la luz atraviesa la disposición en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario. Por tanto, hablamos de una disposición cerrada.

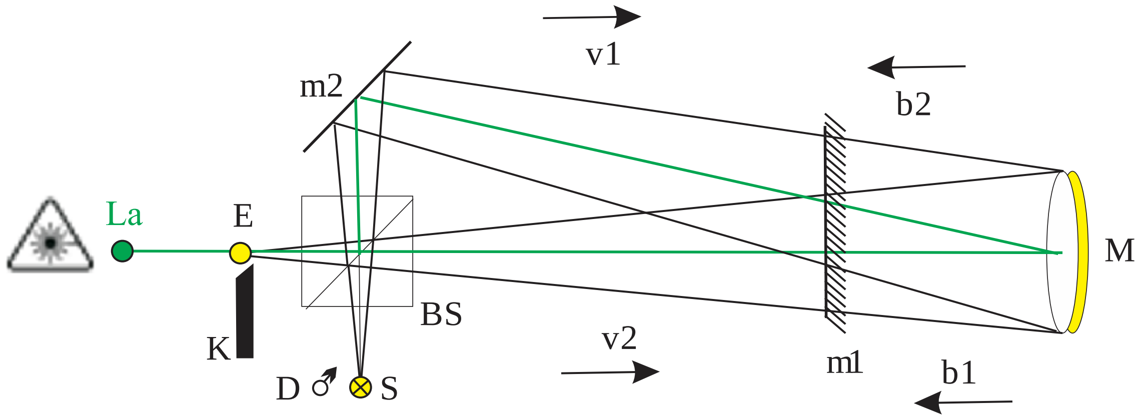




En la disposición siguiente, vemos dos trayectorias luminosas distintas. Un primer haz atraviesa la disposición en el sentido de las agujas del reloj, mientras que el segundo lo hace en sentido contrario.

5.2. Disposición básica

El haz parcial en el sentido de las agujas del reloj sale divergente de S, el beamsplitter Bs y m2 hacia el espejo M. Llamamos a este camino la distancia objetivo v1. La luz converge entonces hacia Bs y E. Llamamos a este camino la distancia imagen b1.



El haz parcial en sentido antihorario atraviesa el montaje divergiendo de S y Bs hacia el espejo M. Esta trayectoria es la distancia imagen v2. Luego la luz va convergiendo hacia m2, Bs y E. Llamamos a este camino la distancia imagen b2.

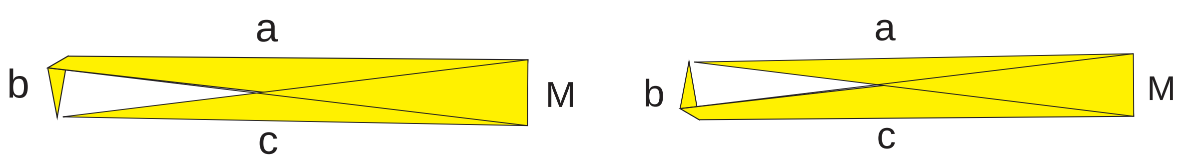
Se reconoce en la forma de la disposición un triángulo con como lado rectángulo Bs-m2, como lado oblicuo m2- M, y como otro lado rectángulo M-Bs. Por tanto, no se trata de una disposición «abierta». La trayectoria de la luz en el sentido de las agujas del reloj es tan larga como en el sentido contrario. Sin embargo, hay una peculiaridad: la trayectoria de la luz hacia el espejo a través de m2 es más larga que la trayectoria de la luz que va directamente de Bs al espejo M. Se trata de una disposición «cerrada» con un camino de luz desigual desde ambos haces parciales hasta el espejo M. Esto tiene su importancia. Volveremos sobre ello más adelante cuando hablemos de la disposición también «cerrada» pero con un recorrido de la luz igual.

En esta disposición, por un lado, existe una especie de proporcionalidad inversa entre la distancia de la imagen previa y la distancia de la imagen expresada en la fórmula del espejo $1/f = 1/v + 1/b$.

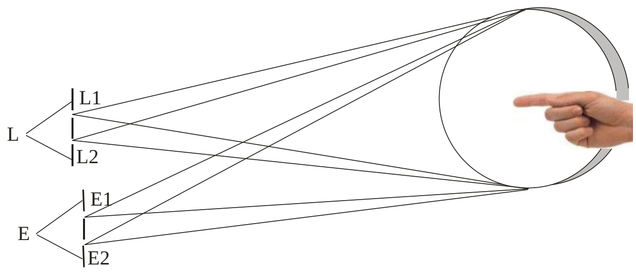
Si la distancia del objeto es larga, la distancia de la imagen es corta y, a la inversa, si la distancia del objeto es corta, la distancia de la imagen es larga.

De alguna manera, se puede decir que esta proporcionalidad inversa también juega en un triángulo : en el dibujo de abajo a la izquierda, la suma de los lados a + b es mayor que el lado c, y en el dibujo de abajo a la derecha, la suma de los lados b + c es mayor que el lado a.

Lo mismo que en el caso anterior se aplica a los dos dibujos siguientes. Pero aquí también se puede ver la analogía con el dibujo anterior que muestra la distancia objeto e imagen, pero en el que a la distancia más larga se le ha dado un «doblez» para que reconozcamos el triángulo en cada una de las dos figuras. Matemáticamente, se trata de elegir la distancia del objeto y de la imagen de forma que encajen perfectamente en el triángulo, de modo que sus puntos de convergencia se encuentren perfectamente en un vértice. Que esto no es tan sencillo se desprende de la operación algebraica necesaria para ello, que reproducimos al final de este texto.

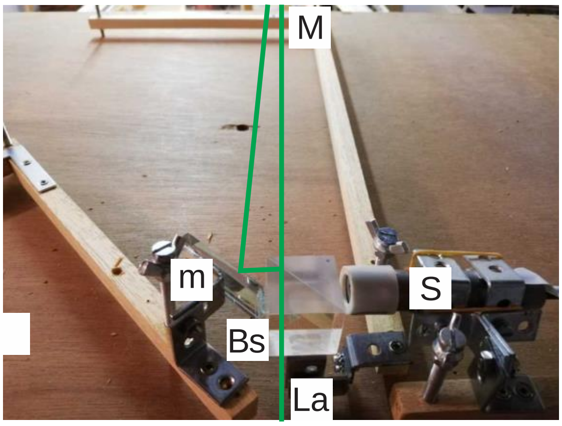


También podemos imaginar el montaje básico como una fuente de luz que se deduplica en dos haces parciales, algo análogo al experimento de las dos divisiones de Young. Tras la reflexión en el espejo, los haces parciales vuelven a unirse, pero esta vez a través de un divisor de haces. Además, en nuestra configuración, la fuente de luz L y la ubicación del observador E, coinciden, por así decirlo.



5.3. Puesta en marcha

Construimos efectivamente el montaje en el banco óptico y colocamos el espejo plano m2 a una pequeña distancia del divisor de haces Bs. Dos haces coherentes, es decir, procedentes de la misma fuente de luz, recorren una trayectoria distinta y después se unen entre sí en E.

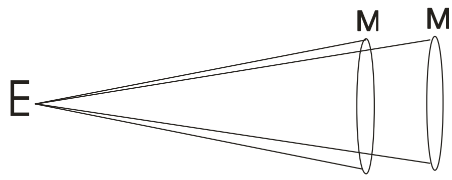


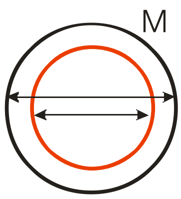
El espejo plano m1 llega hasta la mitad del recorrido de la luz, lo que nos recuerda que en realidad el espejo M1 está justo debajo del observador en E, de modo que se puede ver la propia mano del observador. Por tanto, el dibujo no está en absoluto a escala. En realidad, el diámetro de m1 aquí es igual a 100 mm, por lo que aún puede contener todos los haces parciales en ese lugar. El espejo M está a unos 2500 mm de E, el espejo oblicuo m2 está a unos mm de Bs. Por tanto, existe un paralaje, pero es demasiado pequeño para afectar visiblemente a la imagen.

Vemos que en nuestra disposición, la trayectoria de la luz v1 es más larga que la trayectoria de la luz v2, y la trayectoria de la luz b1 es más corta que la trayectoria de la luz b1. Por lo tanto, llamamos a esta disposición, que forma algo así como un triángulo, «disposición básica con trayectoria luminosa desigual».

Así pues, la luz de M que nos llega a través de b2 ha recorrido un camino más largo que la luz de M que nos llega a través de b1. Por tanto, desde el punto de vista del ojo en E, el espejo

M está más lejos en el primer caso que en el segundo. Esto ilustra de forma exagerada nuestro dibujo de abajo a la izquierda. Así, el ojo ve dos superficies circulares que difieren ligeramente en tamaño.



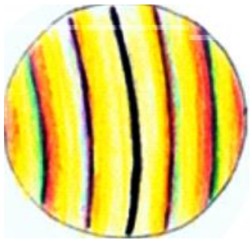
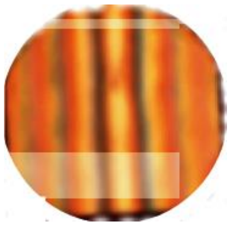


Supongamos que la distancia de Bs a m2 es, digamos, 10 mm, entonces b1 es aproximadamente 2495 mm y b2 es aproximadamente 2505 mm. Si hacemos cuentas, una imagen del espejo desde E resulta entonces tener unos 0,6 mm de diferencia de tamaño con la otra imagen del mismo espejo. Esto nos muestra, muy exagerado, el dibujo de la derecha.

La construcción eficaz de este montaje mostrará que esta diferencia es demasiado pequeña para ser percibida por el ojo a una distancia de 2500 mm, pero lo suficientemente grande como para provocar una imagen de interferencia. Precisamente por eso se trata de un interferómetro radial: ambas imágenes tienen un diámetro diferente.

Como se trata de una interferencia de luz blanca, podemos esperar colores. Recordemos que nuestra «fuente de luz puntual» está equipada con un regulador de intensidad regulable D. Trabajamos con la máxima intensidad luminosa. Alineamos con precisión el montaje con el láser. Hemos comprobado que obtener imágenes de interferencia no es fácil, de hecho estos montajes requieren una precisión casi draconiana. Las ondas luminosas son extremadamente pequeñas, dos mil ondas en un solo milímetro. Con expectativas moderadas, pero esperanzados, miramos nuestro espejo por primera vez. Lo que entonces pudimos ver superó nuestras expectativas más descabelladas.

En el primer dibujo, fiel representación de lo que aparece, vemos que el ajuste aún no está al máximo. Las imágenes de la trayectoria de la luz aún no coinciden perfectamente. Si afinamos con los tornillos de ajuste, las líneas se ensanchan cada vez más, como muestra el dibujo del centro. La imagen de la derecha es una foto tomada con un teléfono móvil.

Estas líneas se ensanchan a medida que el pequeño espejo m2 se acerca a Bs. Tenemos cuidado de que m2 no toque el divisor Bs. Esto último para evitar rayar el divisor. Volvemos a ajustar con cuidado y vemos lo que aparece a la izquierda de la imagen. Parece como si una sola línea se hubiera abierto mucho más. Si ajustamos con más precisión utilizando los numerosos tornillos de ajuste, ya no vemos líneas en la foto de la derecha, sino un círculo central negro rodeado de otro amarillo. Cuesta un poco acostumbrarse y preguntarse qué es exactamente lo que estamos viendo y cómo seguir interpretándolo.

Como curiosidad, los numerosos tornillos de fijación, M6, son cónicos y están provistos de una bola en la parte inferior para minimizar la fricción.

5.4. ¿Cómo interpretarlo?

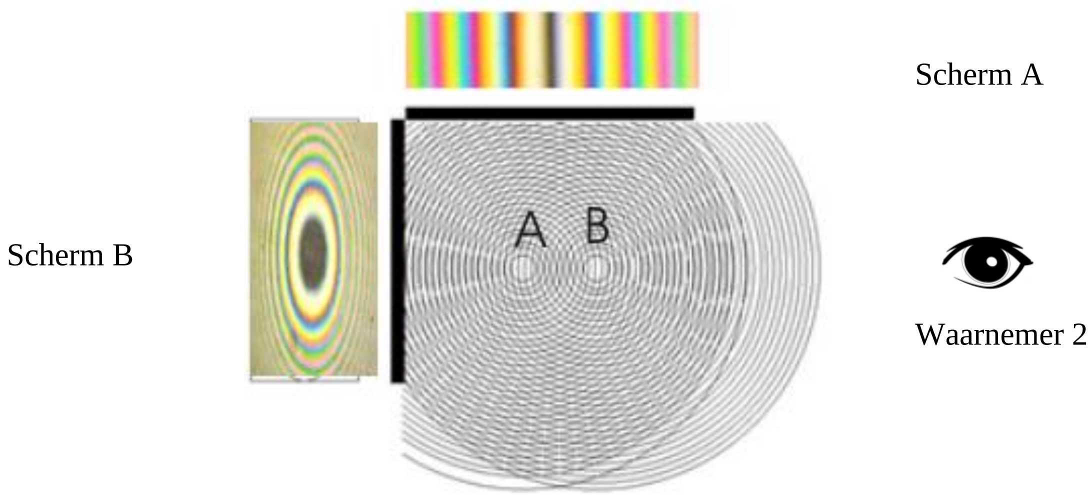
Cualquiera que esté familiarizado con la óptica pensará casi inmediatamente en la prueba de las dos rendijas de Young al ver la primera imagen. La segunda imagen, un dibujo, parece estar relacionada con los conocidos anillos de Newton. Ya hemos explicado ambos fenómenos en el apartado 5.7 del texto.

En el siguiente dibujo queremos explicar la conexión entre el experimento de las dos rendijas de Young y los anillos de Newton.

Observando el dibujo de abajo, vemos que más o menos las dos partes son el mismo suceso de interferencia. Dos puntos de luz, próximos entre sí, generan esferas en continua expansión. Representadas en un plano, aquí se representan obviamente como círculos.

Desde el punto de vista del observador uno, los puntos A y B están uno al lado del otro y generan en la pantalla A una serie de líneas paralelas. Desde el punto de vista del observador dos, los puntos A y B están uno detrás del otro y generan en la pantalla B una serie de círculos, llamados anillos de Newton. Newton los descubrió pero no pudo explicarlos porque no consideraba la luz como ondas sino como pequeñas partículas.

Si colocamos los dos puntos A y B no uno al lado del otro ni uno debajo del otro, sino un poco más en diagonal, entonces en una pantalla, situada entre las pantallas A y B, no habría líneas rectas ni círculos, sino curvas, y esto precisamente como transición entre círculos y líneas rectas. El inglés Young y el francés Fresnel no se pusieron de acuerdo en su época sobre si este fenómeno de interferencia eran derechas o curvas. Al parecer, no miraban desde el mismo punto de vista.

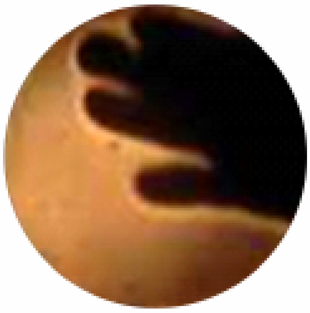


Waarnemer 1

Volvemos a hacer la prueba de Foucault con el cuchillo para llevar la fuente de luz S al punto de curvatura con la mayor precisión posible. A continuación, retiramos el cuchillo y observamos con suficiente intensidad luminosa. Observamos que nuestro espejo está iluminado en toda su superficie con sólo unos pocos colores de interferencia. Eso nos muestra la imagen de abajo a la izquierda. Un ajuste más preciso conduce a imágenes en las que la superficie del espejo se llena con un solo color.

Cuando acercamos la mano a la trayectoria de la luz, vemos una serie de hebras de colores que surgen de ella. La mano está más caliente que el aire circundante y calienta las capas de aire cercanas. Esto cambia el índice de refracción del aire en ese lugar, dando lugar a estas mechas. También podemos ver esto en la imagen de abajo a la izquierda.

Si oscurecemos la constelación al máximo, ya no veremos las volutas, pero volverá a aparecer la banda tenue, brumosa y luminosa alrededor de la mano, como ya observamos en la «versión más oscura» de la prueba de Foucault. Podemos verlo en la imagen de abajo a la derecha.



5.5. La elaboración matemática

A continuación hacemos un recorrido matemático. No funciona sin cálculos. Las matemáticas nos permiten controlar el montaje y comprobar de antemano, incluso calcular, la aparición máxima o mínima de un fenómeno. Por así decirlo, tenemos el control y el poder sobre nuestro montaje. Quien sabe lo que busca, también sabe lo que encuentra. De lo contrario, uno trabaja en el aire, a veces busca en vano y además no siempre entiende lo que encuentra. Atengámonos a la cita de Kurt Lewin de 1947: «No hay nada más práctico que una buena teoría». Aclare con algunos datos el dibujo siguiente.

S = Fuente, fuente luminosa puntual, luz blanca.

M = Espejo, espejo cóncavo (mayúscula), 155 mm de diámetro, f = +/- 1250 mm

m = espejo, (mirror, minúscula) pequeño espejo plano, con capa reflectante encima

Bs = cubo beampslitter para luz visual, 50/50, 20 mm^3.

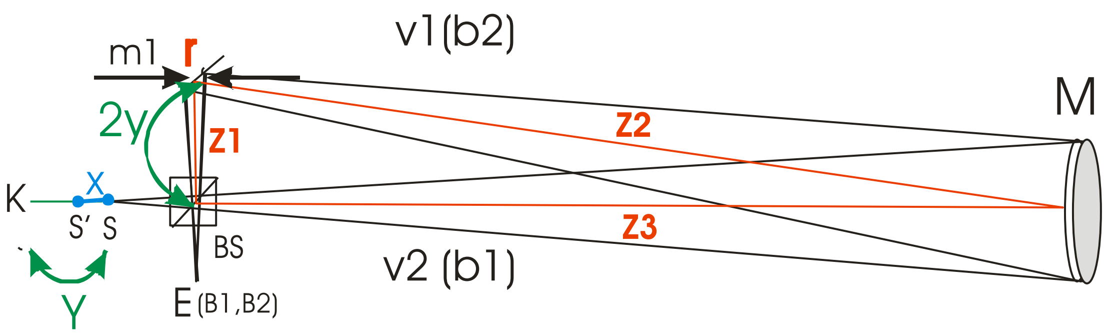
E = ojo, lugar del observador

v = (minúscula) distancia del objeto

b = (minúscula) distancia de la imagen

B = (mayúscula) punto de la imagen

K (mayúscula) = punto central de curvatura



Observa el triángulo rojo, formado por el centro de Bs, m1, M y de nuevo con el centro de BS. Es un triángulo rectángulo, con el ángulo recto en BS. Z1 y Z3 son los lados rectangulares, Z2 es la hipotenusa y es obviamente más larga que Z3.

La distancia 2y, indicada por el arco verde de la izquierda, es la suma del lado z1, más la diferencia de z2 y z3. Más corta; 2y = z1-(z2-z3).

La distancia del centro de curvatura K a S (el arco verde de la parte inferior) es igual a una vez y.

Por último, x (en azul), la distancia de S' a S, viene dada por la fórmula :

$$x = sqr\ (y^2 + f^2) - f$$

Con todos estos datos, intentamos definir las distancias de los objetos. Obtenemos:

$v1 = 2*f - y + 2y + x$ o $v1 = 2*f + y + x$

$v2 = 2*f - y + x$

mediante la fórmula especular $1/f = 1/v + 1/b$ encontramos :

$b1 = v1*f/ v1-f$ $b2 = v2*f/ v2-f$

Ilustrando tenemos los siguientes valores

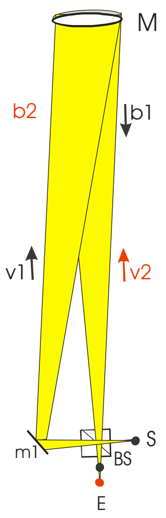
$f = 1250$, $y = 5$, $x = sqr\ (5^2 + 1250^2)-1250$ ó 0,01. Obtenemos

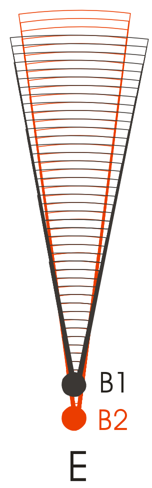
$v1 = 2500 + 5 + 0{,}01$ ó 2505,01, $b1 = 2505{,}01*1250/2505{,}01-1250$ ó 2495,01

$v2 = 2500 - 5 + 0{,}01$ o 2495,01, $b2 = 2495{,}01*1250/2495{,}01-1250$ o 2505,01

Vemos que con estos valores, $v1 = b2$, y también que $v2 = b1$. La importancia de esto se ve inmediatamente cuando nos damos cuenta de que $v2 - b1 = 0$, pero también $v1 - b2 = 0$. Esto significa que teóricamente, para el observador en E, los puntos imagen B1 y B2 coinciden exactamente. Es la situación tal como se explicó en el dibujo 10c.

Si volvemos a hacer el cálculo para otro valor, por ejemplo $y = 10$, y nos atenemos a la fórmula $x = sqr\ (y^2 + f^2) - f$, siempre encontramos que B1 y B2 coinciden. En otras palabras, nuestro montaje nos permite teóricamente hacer coincidir exactamente dos puntos de luz coherentes.

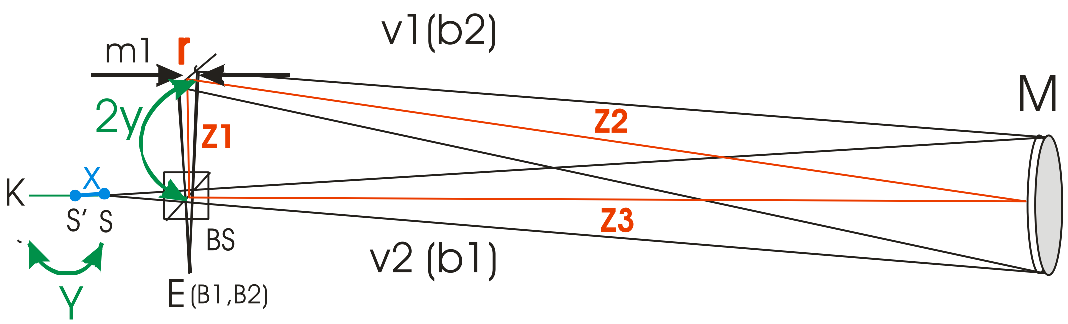




El dibujo de arriba a la izquierda ilustra la trayectoria de la luz en el montaje básico (un montaje cerrado con trayectoria de luz irregular). El dibujo de la derecha muestra un detalle del recorrido de la luz cerca de E. Los haces parciales convergentes b1 y B1 aún no coinciden. Si nos miramos en el espejo, veremos líneas o círculos. Si coinciden, las líneas o círculos son tan anchos que caen fuera de la superficie del espejo.

5.6. La elaboración algebraica

Después de la práctica matemática ahora la teoría matemática. Queremos terminar este quinto capítulo con la explicación teórica que lleva a encontrar la fórmula : x = sqr ($y^2 + f^2$) - f. Tomemos de nuevo el dibujo anterior.



Piensa en la fuente de luz puntual en S' e intenta definir algebraicamente las dos distancias de los objetos. Mirando la imagen de arriba.

Obtenemos

v1, la distancia de proyección en el sentido de las agujas del reloj, es igual a la distancia de S' a S, luego al divisor de haz B, luego al espejo pequeño m1 y finalmente al espejo cóncavo M, o bien:

v1= $2*f - (m - r) + 2*m = 2*f + m + r$. **(1)**

v2, la distancia en sentido contrario a las agujas del reloj, es igual a la distancia de S' a S y más allá a través de B a M o:

v2= $2*f - (m - r) = 2*f - m + r$ **(2)**

Mediante la fórmula especular 1/f = 1/b+1/v encontramos: b = (v*f) / (v-f), de modo que b1, la primera distancia imagen, perteneciente a v1, y que va desde M a través de B en la dirección de E, es igual a

b1 =$(2*f-m+r)*f / (2*f-m-r-f)$ **(3)**

Para b2, la segunda distancia imagen, perteneciente a v2, y que pasa de M a través de m1 y B en dirección a E, encontramos

b2= $(2*f+m+r)*f / (2*f+m+r-f)$ *(4* **)**

A continuación, viendo en la imagen dónde se encuentra b1, encontramos que el camino disponible para b1 es igual a v2. Así que el punto de la imagen B1 (la letra mayúscula para distinguirla de la minúscula b1, la distancia de la imagen) estará a b1-v2 de distancia de E, o:

B1 = b1 - v2

Viendo de forma totalmente análoga dónde se encuentra b2, observamos que el recorrido disponible es igual a v1. Por tanto, el punto B2 se encontrará a b2-v1 de distancia de E.

B2 = b2 - v1

Hallamos la distancia mutua D entre los dos puntos imagen B1 y B2 haciendo la diferencia entre estos dos últimos valores. Obtenemos

$D = B2 - B1 =(b2-v1)-(b1-v2) = (b2-b1) - (v1-v2)$ (5 **)**

De (1) y (2) obtenemos:

(v1-v2)= 2*f-m+r-2*f-m-r= -2*m **(6)**

Así que podemos reescribir (5) como:

D = (b2-b1)+2*m **(7)**

Ahora sustituye en (7) por b2 y b1 los valores obtenidos en (3) y (4):

D = ((2*f-m+r)*f/(f-m+r)) - ((2*f+m+r)*f/(f+m+r)) + 2*m

Ahora resolvemos esta ecuación

$=(((2f^2-fm+fr)*(f+m+r)-(2f^2+fm+fr)*(f-m+r))/(f-m+r)*(f+m+r)) +2m$

$= (2f^3+2f^2m+2f^2r-f^2m-fm^2-fmr+f^2r+fmr+fr^2)/(f+m+r)*(f-m+r)$ -

$(2f^3-2f^2m+2f^2r+f^2m-fm^2+fmr-f^2r-fmr+fr^2)/(f+m+r)*(f-m-r) -2m$

$= (2f^2m/(f+m+r)*(f-m-r)) -2m$

$= (2f^2m/(f^2-fm+fr+fm-m^2+mr+fr-mr+r^2)) -2m$

$= (2f^2m/(f^2+2fr+r^2-m^2) - 2m$ o :

$D = (2f^2m/((f+r)^2 - m^2)) - 2m$ **(8)**

Con esta última expresión, tenemos ahora una fórmula que nos dice a qué distancia están los dos puntos de imagen B1 y B2 en nuestro montaje, y ello en función de la distancia focal f de nuestro espejo M, del valor de m y del desplazamiento radial r de nuestra fuente de luz puntual.

En esta expresión, dejemos que r aspire a 0, y trabajando más obtenemos $D = (2f^2m/(f^2 - m^2)) - 2m$

$D = (2f^2m - 2m (f^2 - m^2)) / (f^2 - m^2)$

$D = (2f^2m - 2mf^2 +2m^3) / ((f^2 - m^2)$

$D = 2m^3/(f^2-m^2)$

Vemos, pues, que el valor de D disminuye a medida que disminuye el valor de m y/o aumenta el valor de f. Si, en r = 0, queremos acercar los puntos de imagen B1 y B2, tendremos que igualar al máximo las distancias de los objetos v1 y v2 y/o utilizar espejos con distancias focales largas.

La pregunta obvia ahora es cuándo coinciden realmente los dos puntos de la imagen, o cuándo el valor de D se hace igual a 0. Calcularemos esto en función de la distancia r, porque este valor puede cambiarse más fácilmente en una disposición moviendo la fuente de luz hacia delante o hacia atrás. Partiendo de la ecuación dada en (8), obtenemos:

$D = (2f^2m / ((f+r)^2 - m^2)) - 2m$, o bien: $(2f^2m / ((f+r)^2 - m^2)) - 2m = 0$

y más adelante:

$2f^2m/ ((f+r)^2 - m^2) = 2m$, o bien

$(f+r)^2 - m^2 = 2f^2m/2m$

$(f+r)^2 = f^2 + m^2$

$f + r = sqr(m^2 + f^2)$, o bien

***$r = (sqr(m^2 + f^2)) -f$* (9)**

Con esta última fórmula tenemos lo solicitado; un valor cero para D en función de r. Por tanto, si r satisface la condición descrita anteriormente, entonces los dos puntos imagen B1 y B2 deben coincidir prácticamente.