

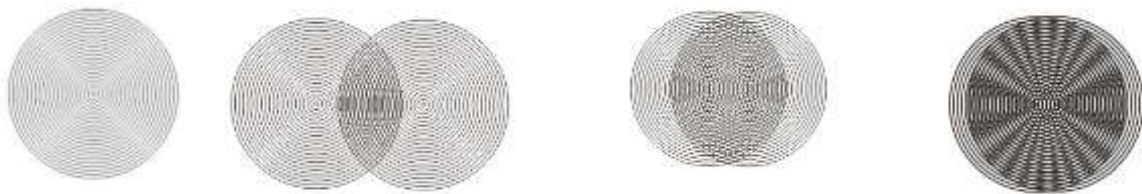
### 3. Algunas explicaciones teóricas y prácticas..

A continuación, ofrecemos una descripción más detallada de los experimentos, para aquellos que deseen entenderlos técnicamente, y posiblemente para aquellos que deseen rehacerlos por sí mismos. En primer lugar, vamos a profundizar un poco en el tema de las interferencias ópticas.

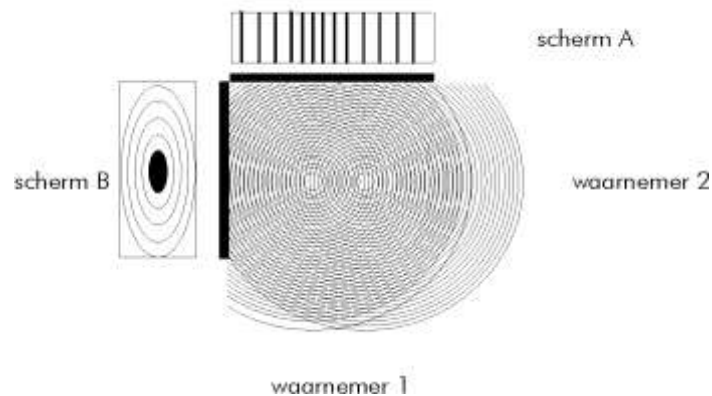
#### **Interferencias ópticas**

Dos puntos luminosos coherentes que están muy cerca el uno del otro generan ondas luminosas que, como muchas esferas concéntricas, siguen expandiéndose y mezclándose entre sí.

Lo ilustramos con dos láminas transparentes en las que están impresos varios círculos concéntricos. Deslizamos gradualmente estas hojas una sobre otra. Parecen formar una especie de moiré.



El documento muestra todo esto en un plano, en dos dimensiones. Sin embargo, en esencia no son círculos, sino esferas en expansión que siguen teniendo una dimensión espacial y otra temporal.



Arriba, vemos una vista superior de dos fuentes de luz monocromáticas coherentes, las llamamos A y B, que están muy cerca la una de la otra. Las franjas negras horizontales y verticales representan cada una la vista superior de una pantalla de proyección. Las pantallas A y B, son las mismas pantallas, pero ahora ligeramente desplegadas, digamos a  $45^\circ$ , lo que nos permite ver lo que se proyecta sobre ellas.

Desde el punto de vista del observador 1, las fuentes de luz A y B se encuentran una al lado de la otra. En la pantalla A habrá una serie de líneas de interferencia paralelas, lo que nos lleva a los experimentos de interferencia de Young y Fresnel.

Sin embargo, desde el punto de vista del observador 2, las fuentes luminosas A y B se encuentran una detrás de la otra. En la pantalla de proyección B serán visibles algunos círculos concéntricos, que hacen referencia a los anillos de Newton.

Intentemos aclarar esto. Las imágenes que siguen son detalles de las imágenes que acabamos de dar.

Veamos primero la pantalla A.

En la parte superior, en el centro, vemos una línea oscura, la línea de interferencia destructiva. El punto C cae sobre esa línea. Todos los rayos luminosos procedentes de A y B que forman la línea en la que se encuentra C, como los rayos luminosos 1 y 2, tienen una fase opuesta y se extinguen mutuamente.

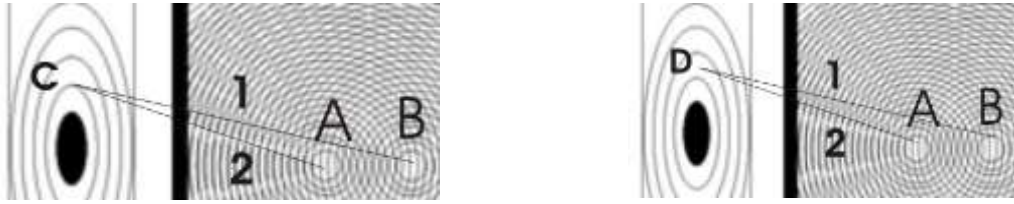
El punto D de la ilustración de la derecha cae sobre una banda de luz más amplia, una línea de interferencia constructiva. Todos los rayos luminosos procedentes de A y B que forman la línea en la que se encuentra D, como los rayos luminosos 1 y 2, tienen la misma fase y se refuerzan mutuamente. La luz es más intensa allí.



***A continuación, vemos la pantalla B.***

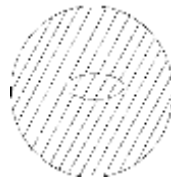
El punto C de la imagen de la izquierda cae sobre un círculo oscuro, un círculo de interferencia destructiva. Todos los rayos de luz de A y B que forman el círculo C, como los rayos de luz 1 y 2, tienen una fase opuesta y se extinguen entre sí.

El punto D de la imagen de la derecha cae sobre un círculo de luz más amplio, un círculo de interferencia constructiva. Todos los rayos de luz de A y B que forman el círculo D, como los rayos de luz 1 y 2, tienen la misma fase y se refuerzan mutuamente. La luz es más intensa allí.



Si ahora se pasa gradualmente de la posición del observador 1 a la del observador 2, teóricamente, estas líneas, que al principio eran paralelas, se transformarán gradualmente en curvas, hasta convertirse finalmente en círculos concéntricos.

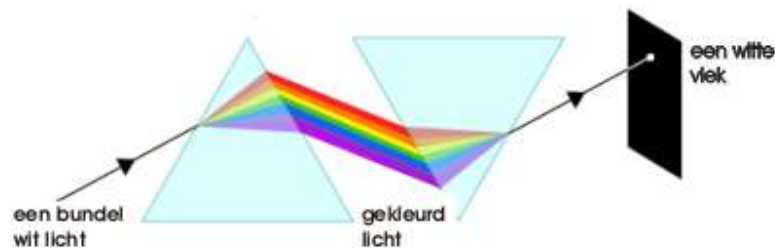
En una determinada forma de microscopía de interferencia (53), el campo de visión se ajusta de manera que se llena de muchas líneas de interferencia destructiva. Una bacteria transparente introducida en la trayectoria de la luz ralentizará la luz haciendo que estas líneas se distorsionen y se desplacen ligeramente. Esto proporciona información sobre la ubicación, la forma y el grosor de la bacteria.



Si las dos fuentes de luz se acercan aún más, estos círculos en la pantalla B serán cada vez más grandes. Finalmente, el anillo central será tan grande que llenará todo el campo de visión del observador. Esto se denomina en anglosajón "anchura de franja infinita". En lo que sigue, lo abreviaremos como "IFW".

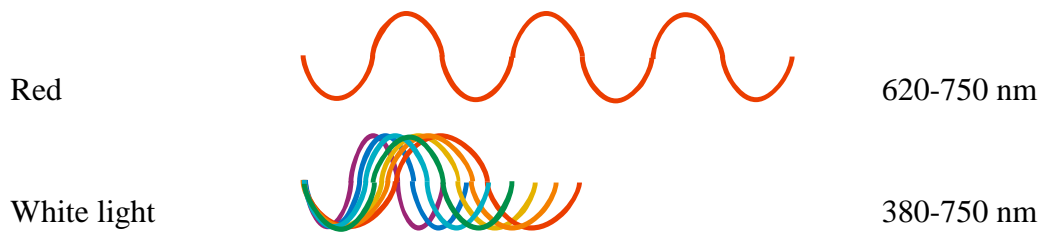
#### Algo sobre los colores

El brillante físico inglés Isaac Newton (1643/1727) demostró que la luz solar que pasa por un prisma se descompone en los colores que la componen. Un segundo prisma puede volver a reunir estos colores para formar la luz blanca.

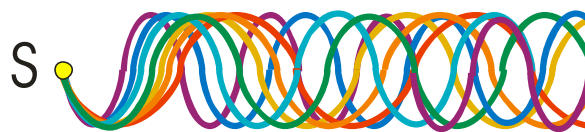


Cada color tiene su propia longitud de onda. La longitud de onda del rojo, por ejemplo, (entre 620-750 nanómetros) es mucho mayor que la del violeta (entre 380-450 nanómetros).

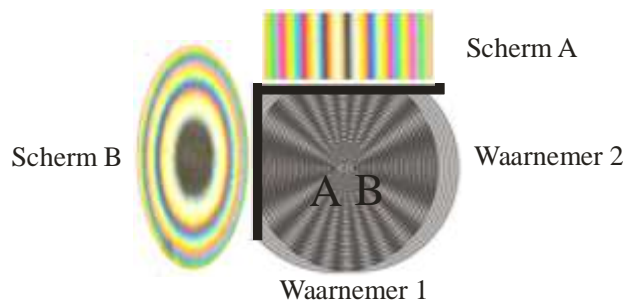




La fuente de luz puntual "blanca" S de abajo genera todos los colores del arco iris. Como hay unas dos mil (!) ondas en un solo milímetro, los diferentes colores se superponen muy rápidamente y la luz blanca se produce de nuevo con bastante rapidez.



En nuestros experimentos trabajamos con luz blanca. Así, las líneas de interferencia y los anillos de Newton en nuestras dos pantallas de proyección tendrán un aspecto bastante colorido. Lo conseguimos:



Lo que eran líneas o círculos negros en las imágenes con nuestra fuente de luz monocromática son ahora líneas y círculos con los colores del arco iris.

A continuación se muestra un detalle tanto de la pantalla B como de la pantalla A y se añade una línea roja en el centro de cada imagen. Vemos que en ambas pantallas las mitades son la imagen especular de la otra.



Si ampliamos el color azul de la línea de interferencia 1, encontraremos el color rojo a su izquierda. Si nos acercamos a la línea 2, encontraremos el color rojo a la derecha de la misma.

Razonemos un paso más. Ajustamos para que toda la superficie de nuestro espejo principal se llene de un solo color del espectro. Si a continuación perturbamos la trayectoria de la luz, por ejemplo, colocando nuestra mano justo delante del espejo, el calor/la evaporación que

emana de nuestra mano ralentizará la trayectoria de la luz en ese punto y provocará un desplazamiento de los colores de interferencia. Es obvio entonces que este desplazamiento estará en función de la línea o círculo de interferencia a la izquierda o a la derecha de la línea o círculo de interferencia destructiva. Es decir, depende de si estamos en la zona de interferencia 1 o 2

Una perturbación en un montaje de interferencia, causada por una luz monocromática, provocará un desplazamiento de las líneas de interferencia. Lo ilustramos con el ejemplo de la bacteria en el microscopio.

Si trabajamos con luz blanca, dicha línea es una serie de colores. Si pudiéramos ajustar nuestro montaje de manera que la superficie del espejo se llenara de un solo color de una sola línea, tendríamos buenas razones para creer que obtendríamos un instrumento mucho más sensible. Esta es, en definitiva, la idea básica de todos los experimentos posteriores que queremos realizar.

### ***Algo sobre los interferómetros***

Como ya se ha mencionado, en un interferómetro la luz se divide en dos haces parciales que se perturban de una u otra manera y luego se vuelven a unir, dando lugar a interferencias y a cambios de color perceptibles.

#### ***Abreviaturas utilizadas***

S = Fuente, fuente de luz puntual.

M = Espejo, espejo cóncavo, 155 mm de diámetro,  $f = \pm 1250$  mm

m = Espejo, pequeño espejo plano, con capa reflectante en la parte superior

Bs = Cubo divisor del haz de luz visual, 50/50, 20 mm

E = Ojo, ubicación del observador

v = Distancia del objeto

b = distancia de la imagen

B = punto de la imagen

K (la letra mayúscula) = centro de curvatura

k (la letra minúscula) = distancia del punto de fulcro

La = láser verde, necesario para alinear los componentes. La se coloca detrás de E, para que al mirar, la cabeza quede entre La y E, reduciendo el peligro de ser cegado por el láser. No obstante, se recomienda apagar el láser al mirar.

IFW: Anchura de franja infinita: Una imagen en la que la superficie del espejo sólo tiene un color del espectro. En otras palabras, una sola línea de interferencia se extiende tanto que M se llena de un solo color.

### ***Un interferómetro radial.***

#### ***1. Enfoque algebraico***

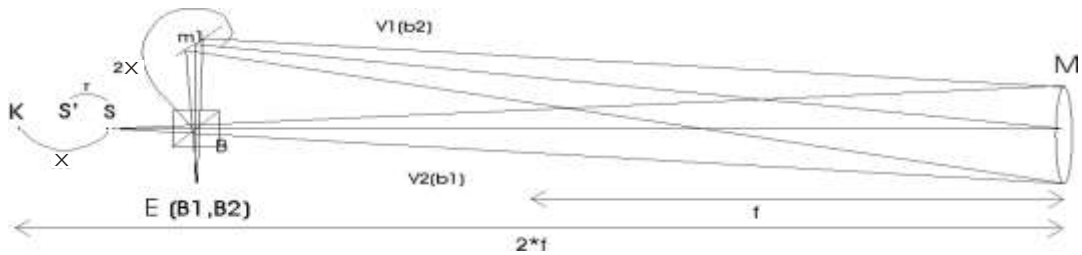
Para la disposición siguiente

a = trayectoria de la luz de S a M en el sentido de las agujas del reloj

b = trayectoria de la luz de S a M en sentido contrario a las agujas del reloj

x = distancia a - b

$r = \sqrt{x^2 + f^2} - f$



A esta configuración la llamamos "configuración básica". Pensamos que la fuente de luz puntual está en S' y tratamos de definir las dos distancias de los objetos algebraicamente.

Obtenemos:

$v_1$ , la distancia del objeto en sentido contrario a las agujas del reloj, es igual a la distancia de S' a S, luego a B, m1 y M, o bien:  $v_1 = 2*f - (x - r) + 2*x = 2*f + x + r$ . (1)

$v_2$ , la distancia en sentido contrario a las agujas del reloj, es igual a la distancia de S' a S y luego a través de B a M o:  $v_2 = 2*f - (x - r) = 2*f - x + r$  (2)

Mediante la fórmula del espejo  $1/f = 1/b + 1/v$  encontramos:  $b = (v*f) / (v - f)$ , por lo que  $b_1$ , la primera distancia de la imagen, perteneciente a  $v_1$ , y que va desde M vía B en dirección a E, es igual a

$$b_1 = (2*f - x + r)*f / (2*f - x - r - f) \quad (3)$$

Para  $b_2$ , la segunda distancia de la imagen, perteneciente a  $v_2$ , y que va desde M a través de m1 y B en la dirección de E, encontramos

$$b_2 = (2*f + x + r)*f / (2*f + x + r - f) \quad (4)$$

Si vemos entonces en el dibujo dónde se encuentra  $b_1$ , observamos que el recorrido disponible para  $b_1$  es igual a  $v_2$ . Así que el punto imagen B1 (la mayúscula para distinguirlo de la minúscula  $b_1$ , la distancia imagen) estará a  $b_1 - v_2$  de E, o bien

$$B_1 = b_1 - v_2$$

Si miramos análogamente la ubicación de  $b_2$ , vemos que el camino disponible es igual a  $v_1$ . Por lo tanto, el punto B2 estará a la distancia  $b_2 - v_1$  de E.

$$B_2 = b_2 - v_1$$

Encontramos la distancia D entre ambos puntos de la imagen B1 y B2 haciendo la diferencia entre estos dos.

Obtenemos:

$$D = B_2 - B_1 = (b_2 - v_1) - (b_1 - v_2) = (b_2 - b_1) - (v_1 - v_2) \quad (5)$$

A partir de (1) y (2) encontramos:

$$(v_1 - v_2) = 2*f - x + r - 2*f - x - r = -2*x \quad (6)$$

por lo que podemos reescribir (5) como  $D = (b_2 - b_1) + 2*x$  (7)

Ahora sustituimos en (7) por  $b_2$  y  $b_1$  los valores obtenidos en (3) y (4):

$$D = ((2*f-x+r)*f/(f-x+r)) - ((2*f+x+r)*f/(f+x+r)) + 2*x$$

Ahora resolvemos esta ecuación.

$$\begin{aligned} &= (((2f^2-fx+fr)*(f+x+r)-(2f^2+fx+fr)*(f-x+r))/(f-x+r)*(f+x+r)) + 2x \\ &= (2f^3+2f^2x+2f^2r-fx^2-fxr+f^2r+fr^2)/(f+x+r)*(f-x+r) - \\ &\quad (2f^3-2f^2x+2f^2r+f^2x-fx^2+fxr-f^2r-fxr+fr^2)/(f+x+r)*(f-x-r) - 2x \\ &= (2f^2x/(f+x+r)*(f-x-r)) - 2x \\ &= (2f^2x/(f^2-fx+fr+fx-xr+r^2)) - 2x \\ &= (2f^2x/(f^2+2fr+r^2-x^2)) - 2x \\ &\text{o } D = (2f^2x/((f+r)^2 - x^2)) - 2x \quad (8) \end{aligned}$$

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

Apuntemos a 0 en esta expresión r, y si seguimos trabajando obtenemos

$$\begin{aligned} D &= (2f^2x/(f^2 - x^2)) - 2x \\ D &= (2f^2x - 2x(f^2-x^2)) / (f^2 - x^2) \\ D &= (2f^2x - 2xf^2 + 2x^3) / (f^2 - x^2) \\ D &= 2x^3/(f^2-x^2) \end{aligned}$$

Vemos que el valor de D es menor a medida que disminuye el valor de x y/o aumenta el valor de f. Si, en r = 0, queremos acercar los puntos de la imagen B1 y B2, tendremos que hacer que las distancias del objeto v1 y v2 sean lo más iguales posible y trabajar con espejos con focos más largos. La importancia de un valor D pequeño quedará clara en lo que sigue, donde se demostrará que entonces tenemos más margen de maniobra para ajustar nuestra configuración.

La pregunta obvia ahora es cuándo los dos puntos de la imagen coinciden realmente, o cuándo el valor de D se convierte en 0. Lo calcularemos en función de la distancia r, porque este valor puede cambiarse más fácilmente en un montaje moviendo la fuente de luz hacia delante o hacia atrás. Si lo calculamos, partiendo de la ecuación dada en (8), encontramos:

$$\begin{aligned} D &= (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ o:} \\ (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x &= 0 \end{aligned}$$

y seguimos calculando

$$\begin{aligned} 2f^2x / ((f+r)^2 - x^2) &= 2x, \text{ o} \\ (f+r)^2 - x^2 &= 2f^2x/2x \\ (f+r)^2 &= f^2 + x^2 \\ f + r &= \text{sqr}(x^2 + f^2), \text{ o} \end{aligned}$$

$$r = (\text{sqr}(x^2 + f^2)) - f$$

Con esta última fórmula tenemos lo que necesitamos; un valor nulo para D en función de r. Por tanto, si r cumple la condición descrita anteriormente, ambos puntos de la imagen B1 y B2 deben coincidir teóricamente.

## 2. Enfoque matemático.

Comprobemos esto con algunos valores concretos.

Diámetro M = 155 mm, f = 1250 mm, Bs = 10mm<sup>3</sup>,

Distancia m1 al centro Bs = 10, entonces 2x = 10mm y x = 5mm.

Si B1 y B2 deben coincidir, entonces r debe satisfacer

$$r = \text{sqr}(f^2 + x^2) - f, \text{ o}$$

$$r = \text{sqr}(1250^2 + 5^2) - 1250 = 0,01\text{mm}.$$

En r = 0,01, D = 0. Comprobemos:

$$D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ o}$$

$$D = (2 * 1250^2 * 5 / ((1250 + 0,01)^2 - 5^2)) - 2 * 5 = 0 \text{ mm}.$$

Obtenemos además

$$v1 = 2f + x + r \text{ o } 2 * 1250 + 5 + 0,01 = 2505,01$$

$$v2 = 2f - x + r \text{ o } 2 * 1250 - 5 + 0,01 = 2495,01$$

Mediante  $1/f = 1/v + 1/b$  obtenemos

$$b1 = (v1 * f) / (v1 - f) \text{ o } (2505,01 * 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01$$

$$b2 = (v2 * f) / (v2 - f) \text{ o } (2495,01 * 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01$$

Comprobemos en qué punto de E se encuentran los puntos B1 y B2:

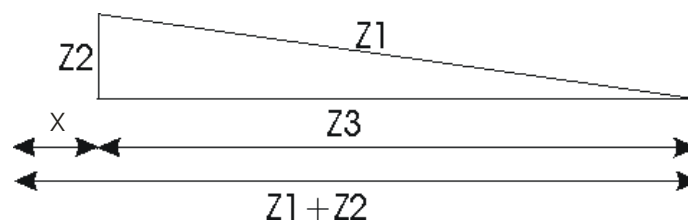
$$b2 - v1 = 2505,01 - 2505,01 = 0$$

$$b1 - v2 = 2495,01 - 2495,01 = 0$$

D es entonces también 0, por lo que teóricamente B1 y B2 coinciden exactamente.

La idea básica de este tipo de interferómetro radial es muy sencilla.

Por un lado: en el triángulo rectangular,  $z1 + z2 > z3$  y  $z1 + z2 - z3 = x$ .

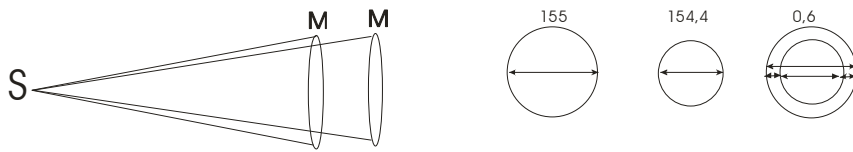


Y por otro lado: si  $v < k$ , entonces  $b > k$  y entonces  $v - b = x$ .

En resumen, hemos descrito y calculado un tipo de interferómetro radial. Se trata de un interferómetro porque dos trayectorias de luz -en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario- se unen en E, y porque estas imágenes no tienen el mismo tamaño. La trayectoria de



la luz M, Bs, E es efectivamente más corta que la trayectoria de la luz M, m1, Bs, E. Y sin embargo, con los valores dados, teóricamente, ambos puntos de imagen coinciden.



### 3. Tres situaciones distintas

Consideremos a continuación cuáles serían las consecuencias para los valores que difieren ligeramente de los calculados en teoría. En otras palabras: preguntémonos si nuestro montaje es factible en la práctica. Supongamos, por ejemplo, que cometemos un error de un milímetro. Calculamos nuestro montaje cuando las distancias son 1 milímetro demasiado cortas, lo comparamos con las distancias que son exactamente según la teoría, y finalmente cuando son 1 milímetro demasiado largas. Para no confundir las distancias del objeto y de la imagen, sustituimos el espejo hueco por una lente en el siguiente dibujo.

**Situación 1: las distancias son 1 milímetro demasiado cortas.**

$$v1 = 2 * f + x + r - 1$$

$$v2 = 2 * f - x + r - 1$$

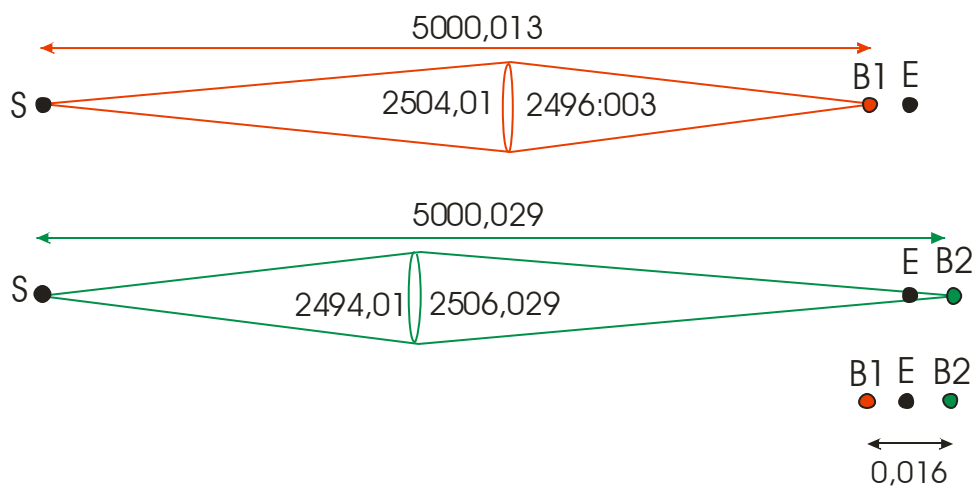
$$v1 = 2504,01 \quad b1 = (2504,01 * 1250) / (2504,01 - 1250) = 2496,003$$

$$v2 = 2494,01 \quad b2 = (2494,01 * 1250) / (2494,01 - 1250) = 2506,019$$

$$v1 + b1 = 2504,01 + 2496,003 = 5000,013$$

$$v2 + b2 = 2494,01 + 2506,019 = 5000,029$$

$$5000,029 - 5000,013 = 0,016$$



Porque  $b_1 = 2496,003$ , pero  $v_2 = 2494,01$ ,  
 $B_1$  cae sobre  $v_2 - b_1$  o  $2494,01 - 2496,003 = -1,993$  pasado E

Ya que  $b_2 = 2506,019$ , pero  $v_1 = 2504,01$ ,  
 $B_2$  cae en  $v_1 - b_2$  o  $2504,01 - 2506,019 = -2,009$  pasado E

Así que  $B_2$  está más lejos de E que  $B_1$ ,  
 su diferencia mutua es  $B_2 - B_1 = 2,009 - 1,993 = +0,016$ ,

**Situación 2: las distancias son iguales.**

$$v_1 = 2 * f + x + r$$

$$v_2 = 2 * f - x + r$$

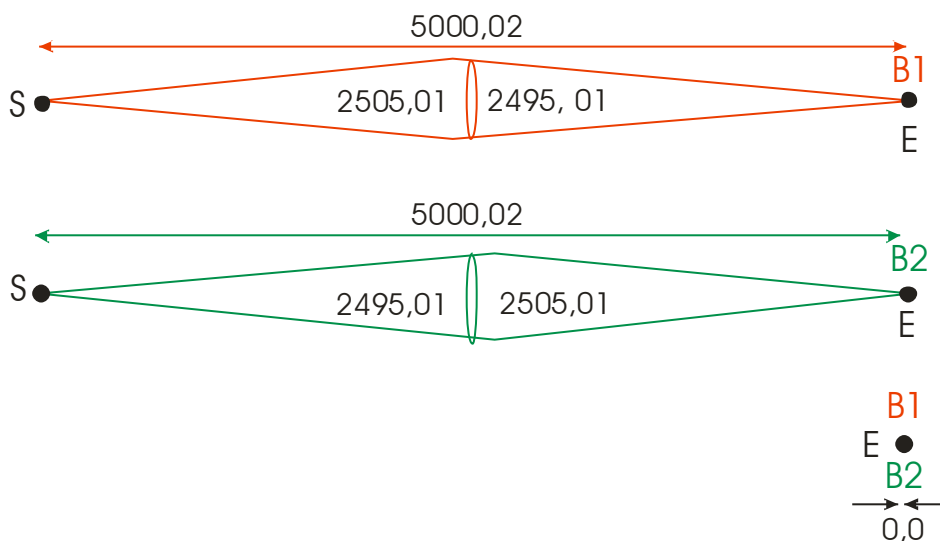
$$v_1 = 2505,01 \quad b_1 = (2505,01 * 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01$$

$$v_2 = 2495,01 \quad b_2 = (2495,01 * 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01$$

$$v_1 + b_1 = 2505,01 + 2495,01 = 5000,02$$

$$v_2 + b_2 = 2495,01 + 2505,01 = 5000,02$$

$$5000,02 - 5000,02 = 0,0$$



Ya que  $b_1 = 2495,01$ , y  $v_2 = 2495,01$ ,  
 $B_1$  cae en  $v_2 - b_1$  o  $2495,01 - 2495,01 = 0$   $B_1$  cae en E

Porque  $b_2 = 2505,01$ , y  $v_1 = 2505,01$   
 $B_2$  cae sobre  $v_1 - b_2$  o  $2505,01 - 2505,01 = 0$  cae sobre  $B_2$  en E

Así que  $B_2$  y  $B_1$  coinciden,  
 su diferencia mutua es  $B_2 - B_1 = 0$

**Situación 3: las distancias son de 1 milímetro de más.**

$$v1 = 2 * f + x + r + 1$$

$$v2 = 2 * f - x + r + 1$$

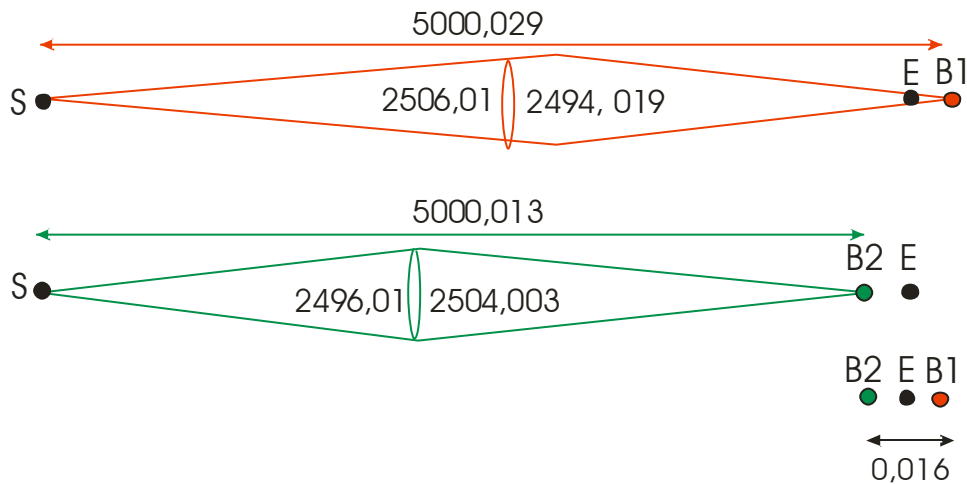
$$v1 = 2506,01 \quad b1 = (2506,01 * 1250) / (2506,01 - 1250) = 2494,019$$

$$v2 = 2496,01 \quad b2 = (2496,01 * 1250) / (2496,01 - 1250) = 2504,003$$

$$v1 + b1 = 2506,01 + 2494,019 = 5000,029$$

$$v2 + b2 = 2496,01 + 2504,003 = 5000,013$$

$$5000,029 - 5000,013 = - 0,016$$



Como  $b1 = 2494,019$ , pero  $v2 = 2496,01$   
 $B1$  cae sobre  $v2-b1$  o  $2496,01-2494,019 = 1,991$  para  $E$

Como  $b2 = 2504,003$ , pero  $v1 = 2506,01$   
 $B2$  cae sobre  $v1-b2$  o  $2506,01-2504,003 = 2,007$  para  $E$

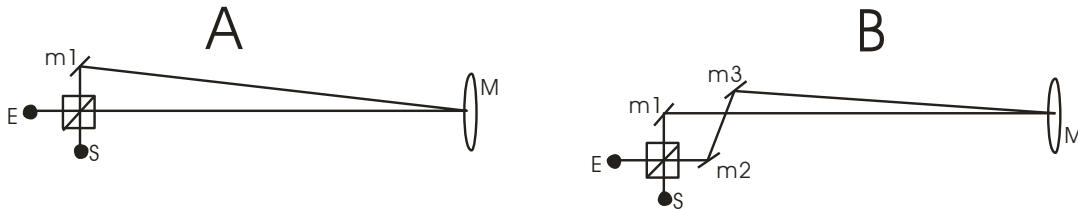
Así que  $B2$  está más lejos de  $E$  que  $B1$ ,  
 su diferencia mutua es  $B2-B1 = 1,991 - 2,007 = - 0,016$ ,

Generalizamos: En la configuración básica, las variables pueden elegirse de forma que, en relación con el espejo  $M$ ,  $B2$  se acerque excepcionalmente después de  $B1$  (1), que ambos coincidan (2), o que  $B2$  se acerque excepcionalmente antes que  $B1$  (3). En otras palabras: teóricamente, tenemos una forma de acercar dos puntos de imagen de forma increíble o incluso de hacerlos coincidir exactamente.

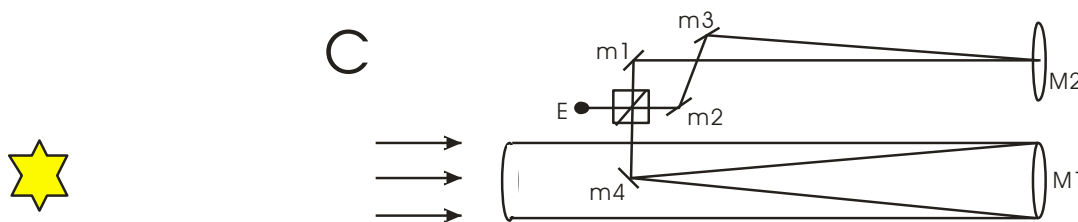
Así, los dos puntos de la imagen pueden acercarse mucho más de lo que se cree posible en el clásico experimento de las dos rendijas de Young.

Veremos que esto abre la puerta a la creación de líneas de interferencia muy amplias.

**Y otra cosa:** en la imagen de abajo, bajo A vemos representado esquemáticamente el montaje básico: el interferómetro radial. Bajo B vemos de nuevo el montaje básico, pero ahora con el mismo recorrido de la luz, de modo que la radialidad se esfuerza por llegar a 0. De este modo se hizo posible conseguir la interferencia destructiva.



One may wonder if other applications are conceivable. For example, under C we have coupled the arrangement B to a newton scope. The question arises whether destructive interference can also be obtained from the image captured in the viewer. In that case, however, we are at the professional level, which reaches much further than what is possible for an amateur.



#### 4. Inicio de la actividad

Algunas observaciones prácticas de antemano.

*Una sala completa.*

Tenga en cuenta que un montaje requiere una habitación entera, que también podemos oscurecer.

*La fuente de luz puntual.*

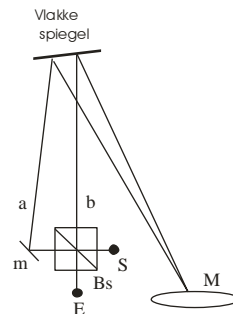
Para S utilizamos una fuente de luz puntual con un diámetro de 0,3 mm. Montamos un extremo de un cable de fibra de vidrio en un trozo de tubo eléctrico de plástico que cerramos con una placa metálica (por ejemplo, de una lata de refresco) y lo pinchamos con una aguja de acupuntura de 0,3 mm. A continuación, lijamos cuidadosamente toda la rebaba y la comprobamos con un microscopio. El otro extremo de la fibra de vidrio se mantuvo a cierta distancia (+/- 200 mm) de una lámpara (+/- 50 vatios). Esto era para evitar que se quemara el soporte de plástico de la fibra. No utilizamos un ventilador porque provoca turbulencias de aire molestas. Y por la misma razón, la lámpara no se colocó en la trayectoria de la luz. También dotamos a la lámpara cercana a E de un regulador de intensidad para poder aumentar o disminuir la intensidad de la luz. También hicimos que la fuente de luz fuera resistente a la luz para mantener la habitación a oscuras.

### *Un láser*

La alineación de cada montaje se realiza con un láser. Debe ser lo suficientemente potente, porque en algunos montajes el recorrido de la luz es de hasta 15 metros. Cuanto más largo sea el recorrido de la luz, más amplio y débil será el punto del láser y más difícil será la alineación. Colocamos el láser detrás de E, de modo que cuando miramos desde E, la luz láser brilla en la parte posterior de nuestra cabeza. Evitamos cuidadosamente que la luz láser incida en el ojo. Sí, con un interruptor a mano, apagamos el láser antes de mirar el montaje.

### *Un espejo plano adicional.*

Queremos averiguar qué se verá de nuestra mano cuando se coloque en tal disposición justo antes de M. Con un valor  $f$  de  $\pm 1250$  mm y un valor  $k$  de  $\pm 2500$  mm, esto obviamente no es posible. Para no depender de los demás para ver la mano, colocamos un espejo plano adicional (de un diámetro de  $\pm 100$  mm) a mitad de la trayectoria de la luz, de modo que, mirando desde E, el observador pueda seguir sosteniendo la mano delante de M y ver por sí mismo lo que se revela.



### *El espejo principal*

Utilizamos un espejo que habíamos rectificamos nosotros mismos con un diámetro de 155 mm, que es más o menos el valor estándar para los que hacen un curso de rectificación de espejos en algún observatorio popular con vistas a construir un telescopio newtoniano.

### *Algunos espejos pequeños*

Además, necesitaremos algunos espejos con la capa reflectante en la parte superior, para evitar los errores que podrían producirse porque la luz tiene que atravesar el cristal de forma diferente. Su tamaño depende de su posición en el montaje. Si están cerca de Bs, 15\*15 mm es suficiente. Nosotros mismos necesitamos unos espejos de 15\*100 mm. Esto se explicará más adelante.

### *Tres espejos auxiliares más grandes (H1,H2 y H3)*

Estos espejos ordinarios nos ayudarán en la alineación de los montajes más difíciles. Utilizamos espejos de unos 100 mm \* 900 mm, con la capa reflectante en la parte posterior. Están unidos a una viga que no es ligeramente más larga. Los tomamos de los viejos armarios de espejos que se colocan, por ejemplo, encima de los lavabos o en las puertas de los armarios. Aunque no son realmente "planos" según los altos estándares ópticos, suelen ajustarse a nuestro propósito.

## **4.1. El montaje básico**

El montaje básico ya se ha explicado en el apartado 1. También se mencionó el uso de un espejo plano adicional.

Dado que todas las piezas están en el mismo "plano", esta configuración es relativamente fácil de construir y de ajustar con un láser. Por ejemplo, en esta configuración no importa si la trayectoria de la luz Bs-m es paralela al banco óptico o no. Si, por ejemplo, se utilizan dos divisores o varios espejos pequeños, entonces, como veremos, el ajuste se vuelve mucho más difícil.

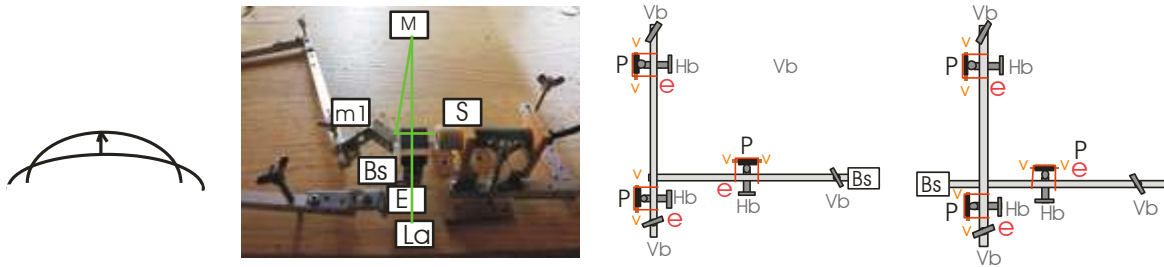
Si se construye este montaje básico, pronto se observarán varias líneas de interferencia o círculos concéntricos. Se puede experimentar aumentando o disminuyendo la diferencia entre las dos trayectorias de luz (s-Bs-m-M y s-Bs-M). Las perturbaciones, las distorsiones de las líneas de interferencia, por ejemplo, al introducir una vela encendida, un cigarrillo encendido o la mano en la trayectoria de la luz, se hacen perceptibles cuando la diferencia de trayectorias se mantiene lo más pequeña posible, es decir, cuando m y Bs están muy próximas y la distancia a M se ajusta estrictamente al cálculo. Nosotros mismos hemos utilizado siempre la prueba del cuchillo de Foucault para ello. La diferencia, sin embargo, era que el cuchillo en E tenía una posición fija, y podíamos cambiar con precisión la distancia a M y m.

El cambio de la distancia de m a Bs se realiza con los tornillos de ajuste. Cambiar la distancia de M a E es algo más difícil. Colocamos M en un carro con 4 ruedas y lo conectamos a una viga más larga que pasó por debajo del banco óptico hasta estar al alcance del observador en E. Para evitar que la viga se doblara, se colocó contra ella una viga metálica de +/- 15 mm de grosor. En el otro extremo del haz (en E) se colocaron un Hb y un Vb, junto con un perno que puede acercar o alejar un poco el espejo M de E.



Obsérvese que un interferómetro radial reúne dos ondas perturbadas de forma similar pero de tamaño ligeramente diferente. Intentemos ilustrar esto con el dibujo de abajo a la izquierda. Donde las dos ondas se "cruzan", se mezclan y hay diferencias de color que pueden ser vistas por el ojo.

Fíjese en el dibujo (la segunda imagen de abajo) que muestra de forma esquemática parte de la configuración básica. Con unos simples hierros angulares, m1 y Bs pueden moverse aproximadamente a lo largo de los ejes necesarios: el espejo m1 a lo largo de los ejes x e y, Bs a lo largo de los ejes x, y y z. A continuación, las varillas de aluminio (diámetro: 10 mm<sup>2</sup>) pueden utilizarse para afinar las piezas necesarias. La línea verde de la fotografía se aplicó posteriormente y pretende indicar la trayectoria de la luz láser. Sin embargo, M queda fuera de la fotografía debido a su gran valor f.



La tercera imagen de arriba, a la derecha, muestra, por ejemplo, a Bs en un soporte modificado. Ambas "palancas" son de aluminio, tienen un diámetro de 10 mm<sup>2</sup> y una longitud de aproximadamente 400 mm. Hb" significa "perno horizontal" y "Vb" "perno vertical". Estos pernos tienen una tuerca de mariposa en la parte superior y se perforaron de forma cónica. En el orificio resultante se pegó una bola para minimizar la fricción entre el perno y el banco óptico al girar el perno.

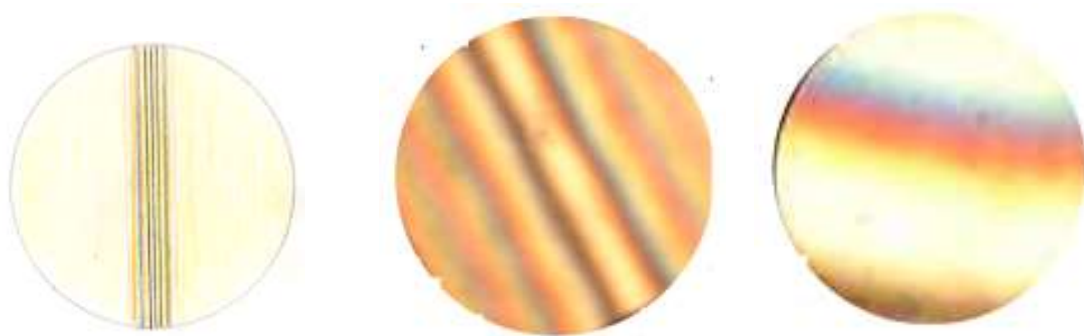
La letra "P" representa un tablero vertical fijo contra el que el perno puede asentarse cuando se aprieta. La letra 'e' representa una camilla que presiona el perno contra el estante, y la letra 'v' representa un pequeño tornillo al que se puede fijar la camilla. Puedes ver que, por la interacción de los 6 pernos, Bs puede moverse según sus 3 ejes, pero también a la izquierda, a la derecha, hacia arriba, hacia abajo, hacia delante o hacia atrás. Todos estos son movimientos que necesitaremos.

La cuarta ilustración muestra una variación del soporte de la Bs. Aquí, la Bs está más centrada. Para cada disposición, se elige obviamente la variante más factible. Todos los espejos pequeños que forman parte de una disposición deben colocarse también en un soporte de este tipo.

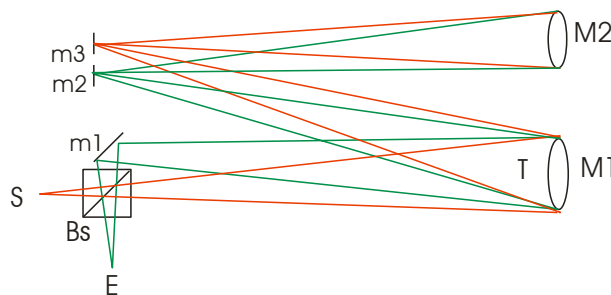
Si un montaje tiene pocas piezas, como el montaje básico, entonces dicho montaje es relativamente fácil de construir. Sin embargo, si un montaje requiere varias piezas, el banco óptico se llena de muchas barras de aluminio que a menudo parecen estorbar. Por lo tanto, es necesario un poco de ingenio para organizar todo de una manera fácil de usar. Recuerde que queremos accionar los tornillos de ajuste principales desde E.

Esto significa que deben estar al alcance de la mano. Los montajes con más de 1 Bs o m también requieren espejos auxiliares planos adicionales. Al alinear, todos los rayos láser deben estar exactamente en un plano. Volveremos a hablar de esto en un momento.



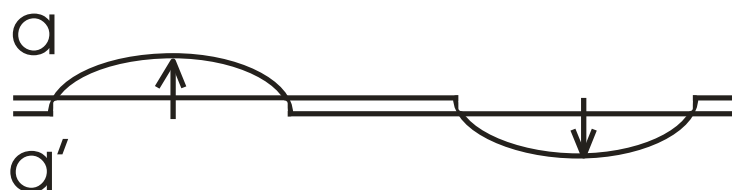


Una variación de este montaje (y de algunos posteriores) consiste en dejar que la luz atraviese la perturbación "T", "T" de "turbulencia", aquí normalmente nuestra mano, una segunda vez. El dibujo de abajo muestra un gran paralaje pero en la práctica esto no juega un papel importante. El espejo M1 está a 2500 mm de Bs y m2 y m3 están justo al lado de m1. Así que el dibujo no está en absoluto en proporción. Nos dimos cuenta de que la calidad de la imagen era menos buena debido a esto. En efecto, la luz recorre aquí una distancia de 15 metros. En principio, esto no puede ser un problema. Llevamos 25 años utilizando nuestros espejos y nunca se han vuelto a recubrir. Quizá eso también influya.



#### 4.2. Un interferómetro de inversión

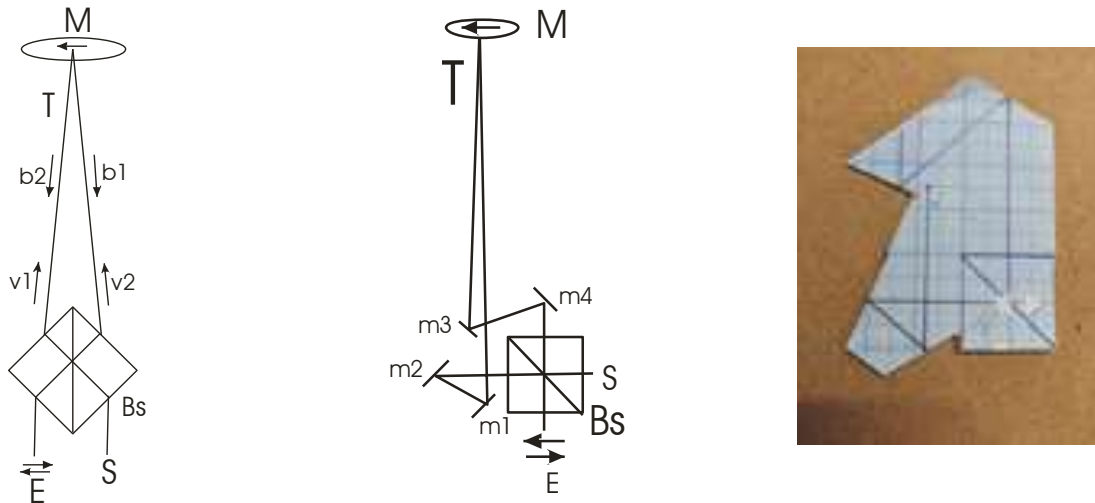
Como ya se ha mencionado, en un interferómetro de inversión, una mitad de la imagen se fusiona con la imagen especular de la otra mitad. Si no pasamos a mano la línea central del espejo, una onda perturbada interfiere con otra no perturbada. Su diferencia mutua, cada vez indicada por la flecha de abajo, es mucho mayor que en un interferómetro radial. Por lo tanto, vemos un cambio de color mucho más intenso. El dibujo del primer texto lo confirma: vemos que la evaporación/calentamiento de la mano hace aparecer dos líneas de interferencia.



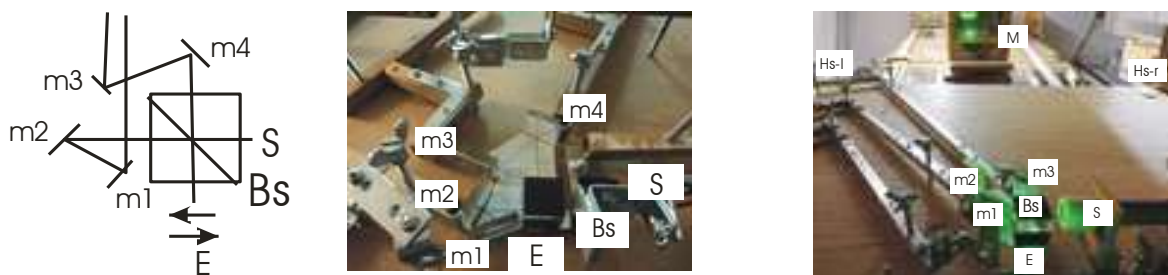
El montaje en la imagen de abajo a la izquierda nos muestra una inversión con una Bs, como se describe en la literatura. Con esto no logramos generar una interferencia amplia. Los haces de luz caen demasiado oblicuamente sobre Bs, lo que dificulta mucho la IFW.



Así que evitamos este problema con el montaje que se muestra en la imagen central. Para que las diferentes trayectorias de luz fueran lo más parecidas posible, utilizamos una tarjeta (imagen de la derecha) en la que las dos trayectorias de luz podían hacerse con precisión casi iguales en longitud, a menos de 1 mm de diferencia de distancia. De este modo, los espejos m1 a m4 pudieron posicionarse de forma muy precisa, también mediante la prueba de Foucault fija.



La foto de abajo muestra un detalle del montaje de la izquierda. En el centro de la foto, preste atención a m4. Muestra la imagen especular de las líneas dibujadas en el cartón. Si ajustamos el espejo m4 de tal manera que vemos la línea dibujada y su imagen especular en la extensión de la otra, entonces sabemos que el ajuste ya es bastante preciso. Por supuesto, esto se aplica a todos los espejos.

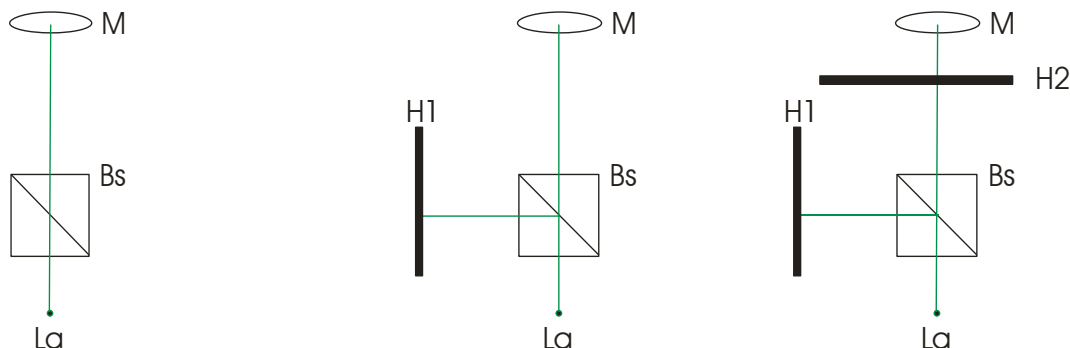


Dado que todas las piezas deben estar exactamente en el mismo plano, esta configuración es mucho más difícil de construir. La alineación láser requiere un algoritmo bien pensado. Nosotros lo hicimos de la siguiente manera.

1. Imagen izquierda. El láser se dirige al espejo principal M. Ajustamos M para que la luz se refleje en el láser. El divisor Bs se coloca en la trayectoria de la luz de tal manera que el haz de luz, antes débil, reflejado desde el frente, coincida exactamente con el láser.

2. Imagen en el centro. H1, se coloca el primer espejo auxiliar. Se coloca de forma que pueda moverse a lo largo de sus dos ejes y de forma que refleje la luz procedente de Bs exactamente de vuelta a Bs.

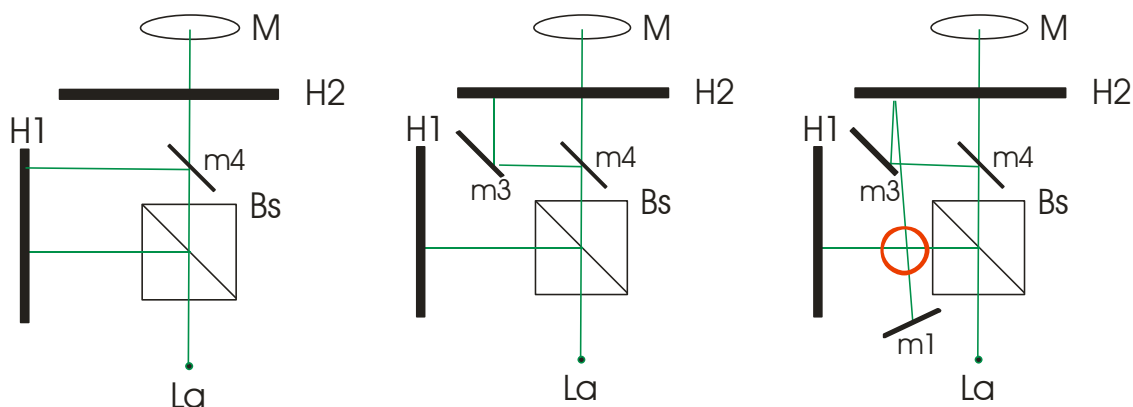
3. Imagen de la derecha. H2, se coloca el segundo espejo auxiliar. Puede moverse a lo largo de sus dos ejes y refleja la luz procedente de Bs exactamente de vuelta a Bs. Este espejo se retirará una vez finalizado el ajuste.



1. Imagen de la izquierda. El espejo m4 está colocado de forma que la luz va a H1 y se refleja en m4.

2. Imagen del centro. El pequeño espejo m3 se coloca de forma que la luz va a H2 y se refleja de nuevo en H2.

3. Imagen de la derecha. Se coloca el espejo pequeño m1. Giramos ligeramente m3 para que la luz reflejada caiga sobre m1. Observa las dos líneas láser que se cruzan en el círculo rojo. En la vista superior, parece que se cruzan. Para asegurarnos de ello, colocamos un trozo de vidrio o plástico transparente en ese lugar de la trayectoria de la luz. En esta placa transparente vemos dos puntos, uno por cada trayectoria del láser. La intención es que estos dos puntos se crucen en el punto de intersección, que coincidan. Si no es así, hay que apuntar con más precisión al m3 y sólo al m3. De esta manera podemos estar seguros de que toda la luz láser sigue en el mismo plano.

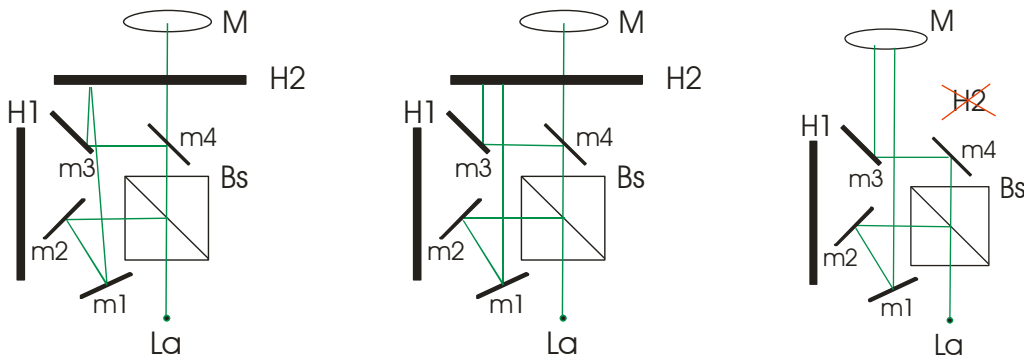


4. Imagen de la izquierda. El espejo m2 se coloca de forma que la luz procedente de Bs incida sobre m1, en el mismo lugar donde la luz láser procedente de H2 ya incide sobre m1. Ahora el espejo m1 puede ajustarse de tal manera que la luz procedente de H2 incida en m2 a través de m1, y la luz procedente de m2 a través de m1 en H2.

5. Imagen en el centro. Los espejos m3 y m1 se levantan ligeramente para que el rayo láser de m3 a H2, después de la reflexión, vuelva a caer sobre m3, y el rayo de m1, sobre m1.

6. Imagen del lado derecho. H2, el segundo espejo auxiliar se retira. El espejo principal M

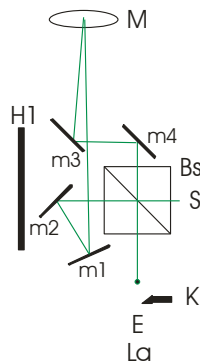
se desplaza un poco hacia la izquierda para que los haces láser de m3 y m1 caigan bien sobre este espejo junto a su centro.



7. Los espejos m3 y m1 se levantan un poco para que su luz caiga limpiamente en el centro del espejo M. Este espejo se ajusta para que la luz vaya de m3 a M, después de reflejarse en m1, y la luz de m1 a M, después de reflejarse en m3.

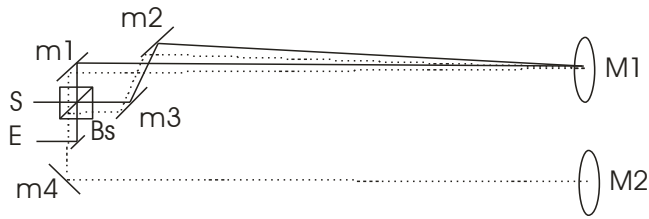
La fuente de luz puntual S (la fibra de vidrio) también se coloca de manera que la luz láser de Bs caiga exactamente en el agujero de 0,3 mm. Por supuesto, S se coloca en un soporte para que pueda moverse con precisión a lo largo de sus ejes. En E, también damos cabida a K, de "Knife", el cuchillo de la prueba de Foucault, una prueba que necesitaremos al ajustar los haces convergentes de luz blanca.

Y no se sorprenda si acabamos apretando unos sesenta tornillos.



#### 4.3. Un montaje de interferencia múltiple.

Si M1 se eleva ligeramente y utilizamos un segundo espejo hueco igualmente grande M2, la luz puede pasar dos veces por el montaje y obtenemos una interferencia de dos interferencias. Vemos en E que aquí las líneas de interferencia verticales se mezclan con las oblicuas, lo que da un patrón de color bonito y simétrico.



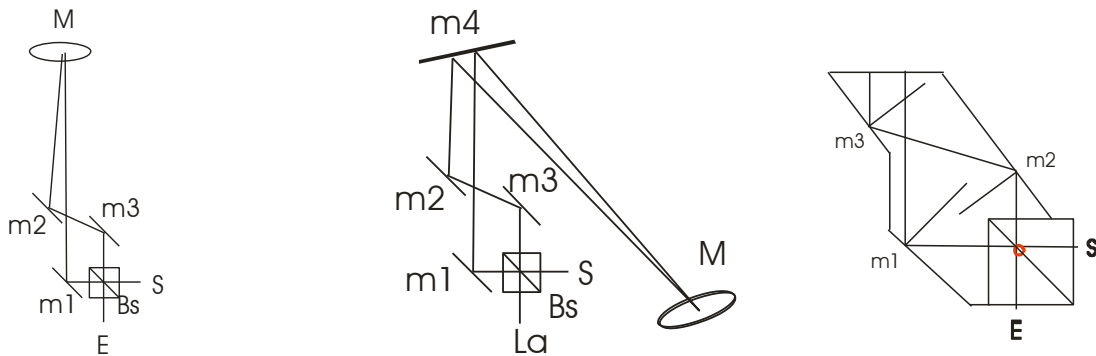
Dejaremos aquí el algoritmo de ajuste. Es una variante del procedimiento de ajuste detallado anterior.

Para conseguir que estas líneas de interferencia sean más anchas, todos los haces de luz deben caer perpendiculares a Bs. Sin embargo, como el espejo principal M está ligeramente inclinado, esto es imposible: las trayectorias luminosas punteadas caen oblicuamente sobre Bs. De hecho, en el divisor Bs vemos dos puntos láser: un punto de luz que va a M1, y a la izquierda de éste el punto de luz ligeramente más débil reflejado desde M1.

Por lo tanto, este montaje no es adecuado para generar líneas de interferencia muy amplias o un IFW.

#### 4.4. Interferometría de nulidad

Decimos que este tipo de interferómetro es una versión "límite" de un interferómetro radial, en el que la diferencia de trayectoria de los dos haces parciales apunta a cero. Esto se consigue añadiendo los espejos m2 y m3 al montaje básico.



El dibujo del centro nos muestra cómo M queda al alcance de E.

El dibujo de la derecha muestra un detalle del montaje. Una vez más, hemos hecho un boceto muy preciso en un programa de dibujo, que luego hemos reducido, impreso, recortado y pegado en un trozo de cartón. Esto es necesario para ajustar los espejos a la distancia y dirección requeridas. Si el ajuste se hace con mucha precisión, conseguiremos así una interferencia destructiva y veremos la tenue banda de luz que rodea la mano.

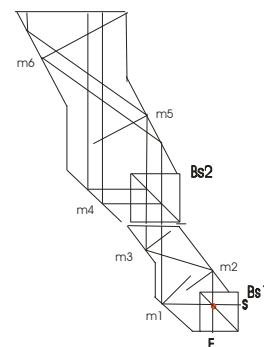
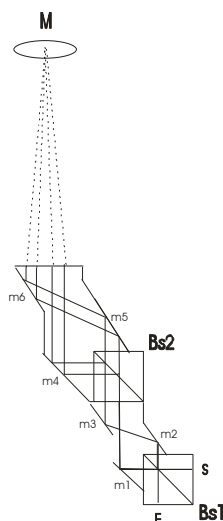
Puede verse que el algoritmo de ajuste es -mutatis mutandis- análogo al procedimiento de ajuste descrito anteriormente.

#### 4.5. Interferencias múltiples con 2 beamsplitters.

Como se indica en el texto anterior, este último experimento puede ampliarse permitiendo que la luz pase por el montaje una segunda vez. Por un lado, se puede iluminar el dedo por segunda vez manteniendo una interferencia, pero por otro lado, se puede hacer permitiendo que la luz sufra una segunda interferencia. A continuación se muestra un esquema de una disposición de este tipo. Por último, también es concebible una disposición con una combinación de las dos anteriores.

En la práctica, sin embargo, están lejos de ser simples. Sin embargo, tras el laborioso ajuste y alineación, que es una verdadera prueba de nuestra paciencia, merece la pena. Las imágenes son hermosas, pero el ajuste es muy sensible. Incluso el suave toque de uno de los tornillos de ajuste da lugar a un panorama caleidoscópico y cambiante de color, hasta que uno observa, casi con la respiración contenida, cómo se estabiliza la imagen. Si a continuación se sostiene la mano frente al espejo, se ve un IFW, y una turbulencia de color bastante intensa, o, si se ajusta para la línea destructiva, la banda luminosa alrededor de la mano. El montaje, mencionado anteriormente como una combinación, no lo hemos construido. Como ya hemos dicho, estamos realmente en los límites de lo que un aficionado puede conseguir aquí.

Veamos a continuación el montaje, algunos trabajos preparatorios y un detalle del montaje. Como se muestra en la imagen, este último experimento no se ha visto afectado por la luz de una segunda vez. Con la ayuda de una interferencia se puede mejorar el rendimiento de los sensores una vez más, pero con la luz se puede reducir la interferencia. Un esquema de la zona y de la operación nos lleva a la siguiente. También es una opción que se puede utilizar con una combinación de las dos anteriores.



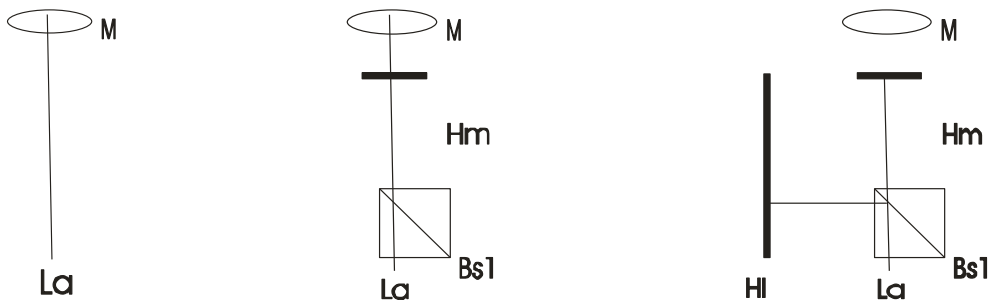
Dado que se utilizan dos divisores de haz, que deben estar exactamente en el mismo plano, esta configuración requiere una precisión aún mayor.

Así es como hemos montado este montaje.

En el dibujo de abajo, a la izquierda, el láser está dirigido al espejo principal M. Los rayos reflejados vuelven a caer en el láser. Los rayos reflejados vuelven a caer en el láser.

En el dibujo del centro, se añade Bs1, y se añade el espejo auxiliar plano M para que la luz reflejada en M sea ahora obstaculizada. Ahora se ajusta Bs1 para que la luz reflejada desde su lado frontal también vuelva a La. A continuación, se ajusta Hm para que la luz reflejada en él también recaiga en La. Hm es entonces perpendicular al rayo láser.

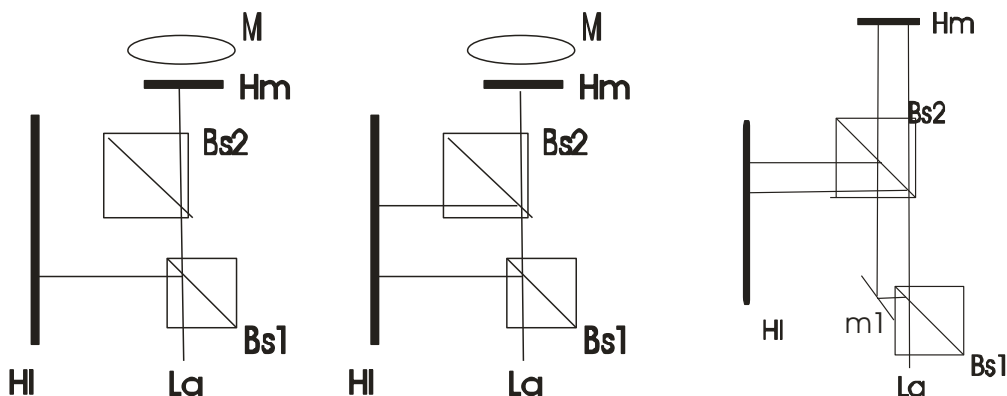
Hl, el espejo auxiliar de la izquierda, se ha añadido al dibujo de la derecha. Está a 600 mm de Bs1. Este espejo también debe reflejar la luz de Bs hacia Bs.



En la parte inferior izquierda, se añade Bs2 y se ajusta de forma que la luz reflejada desde la parte delantera de éste vuelva a caer en el láser.

En el centro, se ajusta Bs2 para que la luz reflejada desde Hl vuelva a caer en Bs2 exactamente en el lugar donde el rayo láser salió de Bs2 y entró en Hl. Se trata de ajustes difíciles y que requieren mucho tiempo.

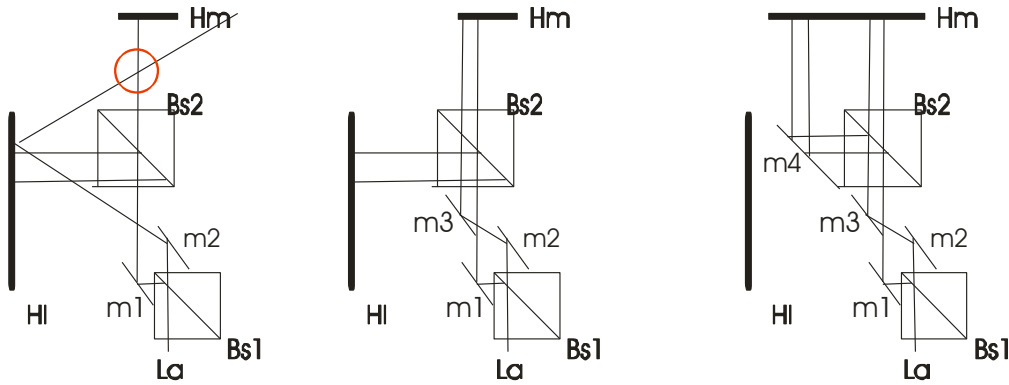
En el dibujo de la derecha, se ha añadido m1 y se ha ajustado para que la luz que va a Hm y Hl vuelva a caer sobre m1.



En el dibujo de abajo, a la izquierda, se ha añadido el espejo m2. No se encuentra a 45° debido a que el recorrido de la luz de ambos haces parciales es igual. El espejo m2 está colocado oblicuamente sobre Hl, que refleja la luz oblicuamente. Ahora sostenga el trozo de plástico translúcido (o vidrio) en el lugar del círculo rojo. El haz de luz que va de Bs1 a Hm debe intersectar la trayectoria de la luz de m2 que se refleja en Hl. Ajustamos m2 de forma que esto se consiga.

A continuación, en el centro, se añade m3 y se ajusta de manera que la luz se refleje desde ella a Hm, de vuelta a m3.

A la derecha se añade m4, de forma que los rayos hacia Hm se reflejen de nuevo en m4.

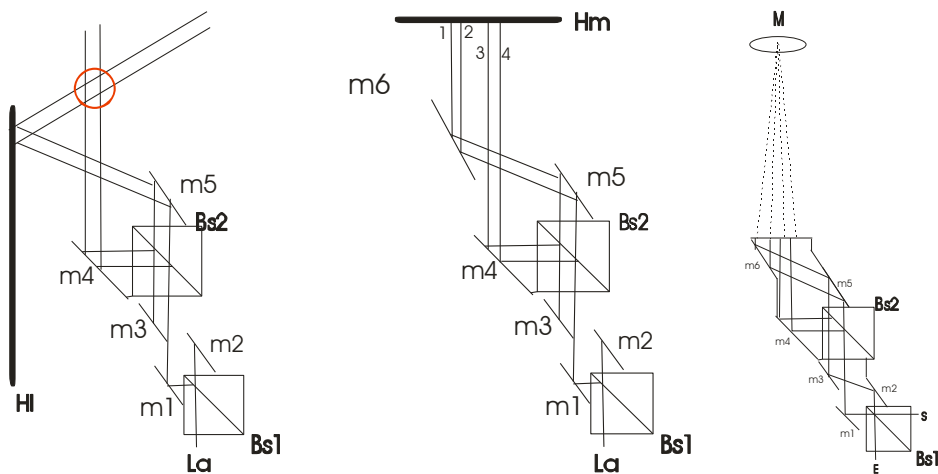


En la parte inferior izquierda, se añade m5 y se ajusta para que los rayos reflejados de m4 se crucen a través de m5- hl.

En el centro, se añade m6 y se ajusta para que los rayos reflejados de Hm, vuelvan a caer sobre m6. Debido a la divergencia que se mostrará al utilizar luz blanca, m6 ya es mucho más largo que, por ejemplo, m1. En nuestros experimentos, m6 ya tenía una longitud de 80 mm.

Finalmente, se quita Hm, se coloca M de forma que los haces 1, 2, 3 y 4 caigan a igual distancia del centro de M. Los espejos m1 y m4 (y sólo éstos) se cablean suavemente para que los haces 1, 2, 3 y 4 caigan exactamente en el centro de M. Si todo el procedimiento es exacto, 1 reflejará a 4 y 2 a 3 y estos 4 haces serán todos de la misma longitud.

Al final, nos mostrarán una interferencia de dos, lo que hace que esta disposición sea excepcionalmente sensible a las turbulencias.



Con todo este montaje, nos planteamos la pregunta de si se podría demostrar la existencia de este fino polvo. Nuestros experimentos han reforzado nuestra convicción y nos parece que esta pregunta está más que respondida.

experimentos ópticos  
de 2000 a ...?

### ***Otras referencias***

53. Einführung in die neueren Methoden der Lichtmikroskopie, G. Braun, Karlsruhe, 1967, p 118. and, more generally: J. James: Microscopic methods of observation. A. Oosthoek, Utrecht, 1969.