

H El hombre en el punto de mira, una investigación óptica del aura (parte II). .

Este segundo texto sigue : "El hombre en el espectador, una investigación óptica del aura, Parte I". Suponemos que el lector o la lectora está suficientemente familiarizado con los conceptos ópticos allí explicados. Entrando en más detalles, para los que quieran dar sentido a estos experimentos, posiblemente para los que quieran rehacerlos en el propio banco óptico.

El experimento de Michelson y Morley realizado en 1887 ocupa un lugar importante en este texto. A continuación, trató de demostrar que en el universo no es necesario suponer la existencia de una sustancia fina uniformemente distribuida llamada "éter". Sin embargo, en una forma ligeramente modificada que presentamos aquí, y con una precisión que quizá no era posible en aquel momento, resulta que este experimento demuestra de hecho la existencia de una sustancia extremadamente fina, aunque de forma no uniforme. Y esto nos parece una curiosa vuelta de tuerca: el mismo experimento conduce primero a una falsificación, y 125 años más tarde y de forma ligeramente modificada, a una verificación. Todo esto, y más, queremos explicarlo en detalle a continuación.

En todos los tiempos y en muchas culturas se escuchan testimonios de personas que afirman que no sólo tenemos un cuerpo biológico, sino que también poseemos un conjunto de cuerpos materiales sutiles, el llamado "aura". En la filosofía occidental contemporánea, el tema apenas se discute. La ciencia natural actual tampoco está -por decirlo suavemente- demasiado interesada en este tema y no está realmente desbordada de investigaciones en este ámbito. Es comprensible que no se busque algo cuya existencia se niega. Sin embargo, fue uno de los temas más importantes entre los fundadores de nuestra filosofía: los antiguos pensadores griegos. Incluso en el cristianismo -el segundo pilar de nuestra civilización occidental- la creencia en la existencia de una sustancia fina nunca está lejos. A finales del siglo XIX, el tema parece volver brevemente al interés científico, y ello en medio de toda la polémica que rodeó en su momento al famoso "experimento de Michelson y Morley". Razón suficiente para echar un vistazo más de cerca.

1. El experimento de Michelson y Morley.

Todo el mundo ha tenido la experiencia de sentarse en un tren parado junto a un segundo tren. Si un tren partía suavemente, no quedaba inmediatamente claro si era el propio o el otro, y había que buscar un punto fijo de orientación, como la estación o el propio andén. Pensando más en esto, encontrar ese punto fijo de orientación, en cualquier lugar, no parece nada sencillo. La Tierra gira alrededor de su eje, y alrededor del Sol, que a su vez forma parte de una galaxia en rotación, y todos ellos pertenecen también a un universo en expansión. Entonces, ¿existe un punto fijo en algún lugar del espacio?

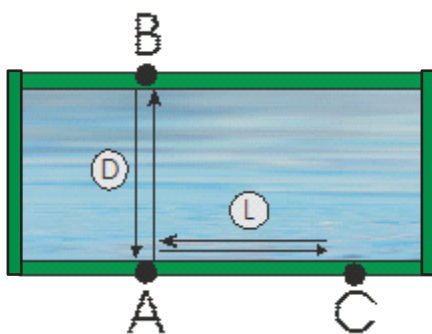
En su *Philosophia Naturalis* (1687), Isaac Newton adoptó los conceptos de tiempo y espacio absolutos. Supuso que el tiempo transcurre de manera uniforme, con total independencia de todo lo demás. Y el espacio era también una especie de patrón fijo, que permitía determinar la posición correcta de cada objeto en el universo. Algo en el espacio desempeñaba el papel de un sistema de coordenadas fijo y garantizaba que el lugar y el movimiento pudieran fijarse de forma absoluta. En su momento, esto no supuso un problema inmediato para Jan Modaal.

El avance de la ciencia sí vio una dificultad aquí. Si todos los movimientos son sólo movimientos relativos a otra cosa, ¿existe un punto de referencia fijo en el espacio, o toda la mecánica celeste se apoya en arenas movedizas?

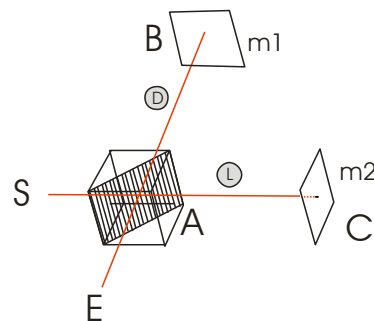
Las ondas que se mueven en el agua tienen a ésta como medio, y el sonido utiliza el aire para propagarse. Así que no parece tan descabellado suponer que la luz del sol y de las estrellas que llega a la tierra lo hace a través de un medio. Así, la física acogió un medio hipotético, una sustancia intermedia extremadamente fina llamada "éter", que llena todo el espacio de manera uniforme, y que también podría servir de patrón para las mediciones absolutas del tiempo y el espacio. La cuestión era si se podía demostrar experimentalmente su existencia y cómo. Un experimento de este tipo fue realizado en 1887 por Michelson y Morley, -en adelante abreviado en este texto como el "experimento M&M"- con un dispositivo basado en la interferencia de la luz.

Aclarar a continuación. El dibujo de la izquierda (1a) representa un agua quieta, por ejemplo una piscina, con los puntos A, B y C en sus bordes, de forma que la distancia AB es igual a AC. D y L son dos nadadores que nadan igual de rápido. D cruza la piscina de A a B y vuelve, L nada longitudinalmente de A a C y vuelve. Por lo tanto, es obvio que ambos llegan al punto A de vuelta al mismo tiempo.

Ahora mira el dibujo de la derecha (1b). Se trata de una representación esquemática del aparato, un llamado "interferómetro", con el que se realizó el experimento M&M. Aquí, S ('S' de Source) es una fuente de luz, que ilumina un beamsplitter BS, un cubo con un espejo semitransmisor en diagonal, del que A es el centro. Las figuras m1 y m2 (dos veces la "m" minúscula de espejo) son dos espejos planos. Se colocan de manera que la distancia AB sea igual a la distancia AC.



1a

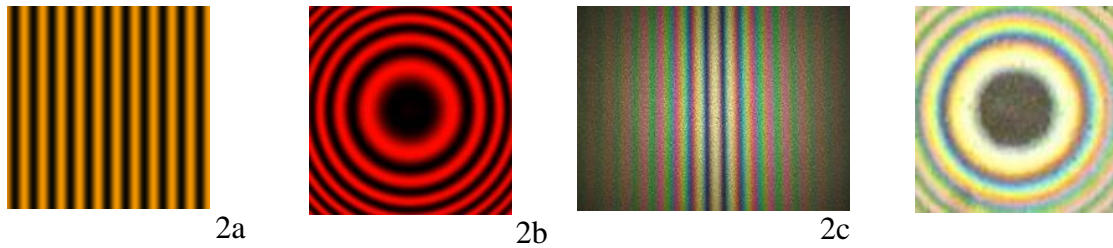


1b

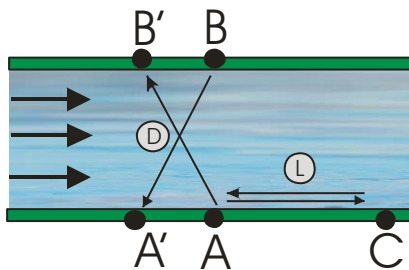
La luz procedente de S se divide en el centro de Bs, llamamos a este punto A. Un haz parcial va a B, se refleja en A y llega al observador en E. El otro haz parcial va a C, se refleja en A y también llega a E. Se puede ver la analogía entre los dos diagramas en 1a y 1b. Cuando (en 1b) los dos haces parciales recorren un camino común AE, se puede esperar que aparezca una imagen de interferencia.

Si se trabaja con luz monocromática, se ve efectivamente una serie de rayas o círculos paralelos claros y oscuros. Si se trabaja con luz blanca, estos tendrán los colores del arco iris. Buscamos en Internet y encontramos imágenes como las que se muestran en 2a a 2c, como resultados del experimento M&M. La imagen 2d no lo es. Es una imagen de unos anillos de Newton. Tal vez buscamos mal, pero no encontramos círculos de colores como resultado de un experimento con M&M. Tal vez se puedan encontrar. Si es así, serán muy similares a lo que

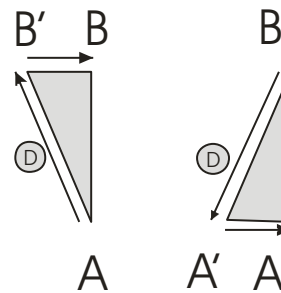
muestra la figura 2d. Más adelante volveremos a tratar en detalle la formación de estas líneas y círculos.



De vuelta a la piscina. Lo sustituimos por un río con agua corriente (3a). Ahora bien, no es nada seguro que los dos nadadores D y L lleguen juntos a A después de su nado. Porque supongamos que el agua fluye bastante rápido en la dirección de A a C, el nadador L hará una salida impresionante, pero una vez en C nadará mucho más trabajosamente contra la corriente. Perderá más tiempo que el nadador D para volver a entrar en A.



3a



3b

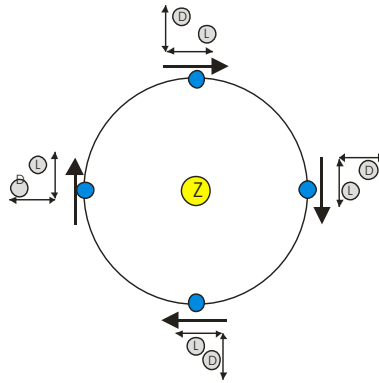
Esto se puede demostrar de forma sencilla utilizando el teorema de Pitágoras (3b). Si hay una corriente, entonces D debe nadar continuamente desde A hacia la dirección B', a la izquierda de B, para llegar a B. Pero entonces ha recorrido una distancia igual a la hipotenusa (AB') del triángulo rectángulo AB'B.

Si entonces D quiere volver nadando a A desde B, tendrá que mantener la dirección hacia A', a la izquierda de A. Entonces habrá recorrido una distancia igual al lado oblicuo (BA') del triángulo rectángulo ABA'. En cualquier caso, esa distancia es mayor que el cruce directo AB o BA.

A su vez, el nadador L tiene inicialmente la velocidad del agua que fluye a su favor, pero en su regreso de C a A, la tiene en su contra. Un ejemplo numérico muestra que el nadador L tardará entonces más que el nadador D.

Consideremos este último hecho, pero ahora situado en el interferómetro como se representa en el dibujo 1b. Ambos haces de luz D y L atraviesan el éter estático. Pero como la tierra nunca está en reposo, el interferómetro, situado en algún lugar de la tierra, no mantiene siempre la misma posición respecto a ese éter.

Veamos el dibujo 4. Si todo el espacio está lleno de una sustancia central estática y uniformemente distribuida, entonces la tierra (el círculo azul), entre otras cosas debido a su movimiento alrededor del sol (el círculo amarillo), escindiré esta sustancia central en el curso de un año en una dirección siempre cambiante.



4

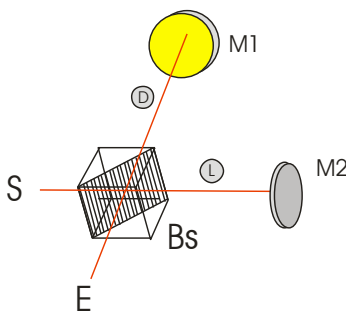
Con el cambio de estaciones, la Tierra se desplaza a través de esta sustancia unas veces en sentido transversal y otras en sentido longitudinal. Pero entonces los dos haces de luz no llegarán siempre juntos a A, como no lo hacen nuestros nadadores D y L.

En el experimento M&M, se esperaba que esta diferencia de tiempo se manifestara a través de una imagen de interferencia alterada. Sin embargo, cuando se realiza de forma meticulosa y efectiva, resulta que los rayos de luz D y L siempre llegan juntos a A. Y esto independientemente de la posición del interferómetro respecto a la supuesta sustancia central. Este resultado, la imagen de interferencia sin cambios observada repetidamente, llevó a Einstein a concluir que no es posible establecer un movimiento uniforme con respecto al éter. Y si tampoco se puede demostrar su existencia en sí misma, tampoco parece tener sentido afirmar que la tierra y los cuerpos celestes se mueven a través de ella. Hasta aquí la descripción de este famoso experimento y su interpretación científica.

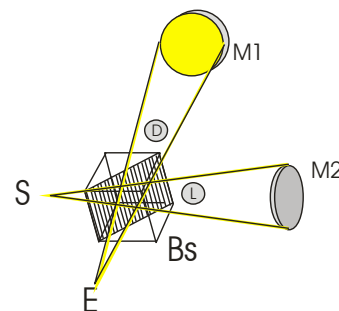
2. Buscas algo y encuentras otra cosa .

Hace años, con cierta ingenuidad y exceso de confianza, intentamos rehacer este experimento de M&M, o más bien una variante autoconcebida del mismo. No utilizamos espejos planos, sino dos espejos huecos M1 y M2 (la "M" mayúscula de Espejo). Alineamos todo con un láser (5a) y nos aseguramos cuidadosamente de que toda la luz del láser estuviera bien en un plano.

Después (dibujo 5b), sustituimos el láser por una fuente de luz blanca puntual, una fibra de vidrio de 0,3 mm de diámetro. Aquí, ambos haces de luz divergen desde S y Bs hacia ambos espejos M1 y M2 para converger de nuevo a E después de la reflexión.



5a

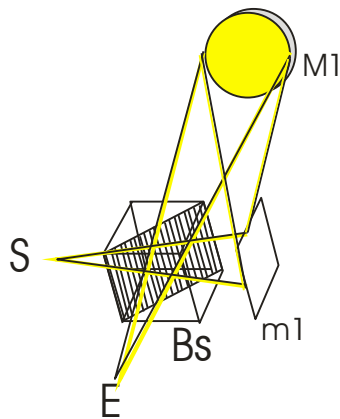


5b

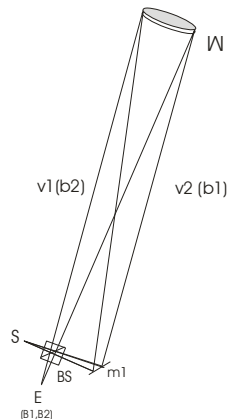
Una vez que el montaje estuvo listo, buscamos con cierta impaciencia en E la imagen de interferencia que debía formarse. Resultó que no había ni el más mínimo rastro de una incipiente

interferencia. Frustración por todos lados. ¿Razón? Es simplemente imposible para un aficionado poner los espejos M1 y M2 a igual distancia de Bs, y a una componente de unas pocas ondas de luz. Pero no nos dimos cuenta de eso en ese momento.

Entonces, por una especie de insatisfacción, sin más, simplemente porque no queríamos asumir que no habíamos conseguido nada en absoluto con nuestro montaje, sustituimos el espejo hueco M2 por el espejo plano más pequeño m1 (6a). Pero este entonces tuvo que estar mucho más cerca de Bs, dada la divergencia del rayo. En el dibujo 6b, las proporciones son ligeramente más realistas. En efecto, el espejo M está a unos 2500 mm (la distancia del centro de curvatura k) del divisor Bs.



6a

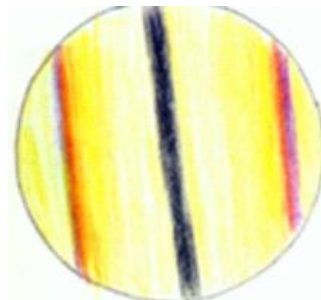


6b

La imagen que se formó entonces en E nos sorprendió por completo. Vimos dos superficies de espejo -una superficie de espejo de cada trayectoria de luz- que casi coincidían, con líneas de interferencia que empezaban a formarse (7a). Si ajustamos ligeramente el espejo m1, las líneas se vuelven de repente mucho más anchas (7b). Cambiando de nuevo la posición de m1, vemos que la superficie del espejo se llena de unos cuantos círculos concéntricos, con los colores del arco iris (7c). Si comparamos estas líneas y círculos bastante amplios con los resultados (2a a 2d) del experimento de los M&M, puede quedar claro que, casi por casualidad, nos topamos con algo inusual.



7a



7b

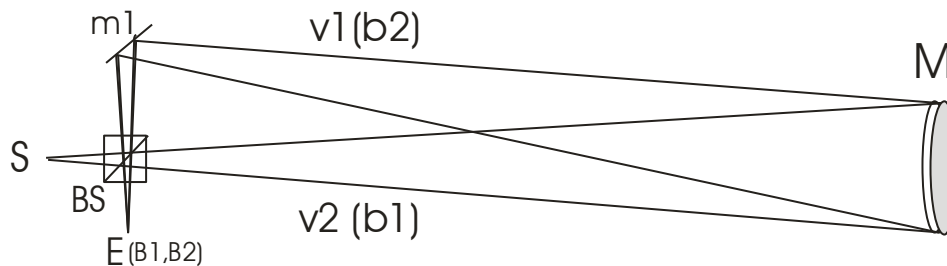


7c

Y no teníamos ninguna explicación para ello. Así es, cuando no sabes lo que buscas, no sabes lo que vas a encontrar. Así que es hora de informarse sobre todo esto en serio y en detalle. Y eso se convirtió en el comienzo de una búsqueda fascinante, que finalmente nos hizo comprender lo que estaba ocurriendo. Más que eso, nos permitió concebir y proponer una serie de otros experimentos, y algunos de ellos realmente realizados... y de eso trata este texto.

3. Nuestro montaje básico: un tipo de interferómetro radial.

Como ya se ha mencionado, en un interferómetro la luz se divide en dos subhaces que luego se reúnen y, en condiciones bien definidas, pueden dar lugar a interferencias, a cambios de color. A continuación, describimos un tipo de interferómetro radial. Obtenemos:



8

S = Fuente, fuente de luz puntual, luz blanca.

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

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

Bs = cubo de beam splitter para luz visual, 50/50, 20 mm³.

E = Ojo, lugar del observador

v = (minúscula) distancia del objeto

b = distancia de la imagen (en minúsculas)

B = (letra mayúscula) punto de imagen

K (mayúscula) = punto central de la curvatura

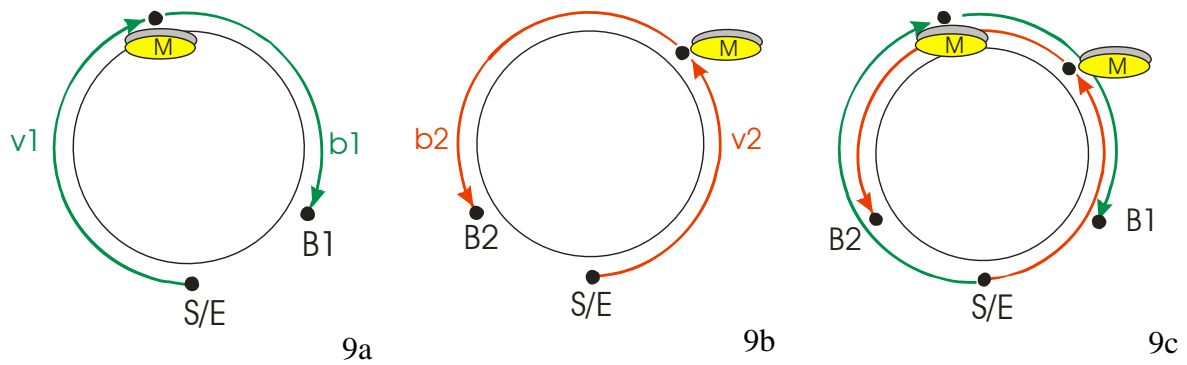
k (minúscula) = distancia del punto central de la curvatura

Llamamos a esta disposición "disposición básica".

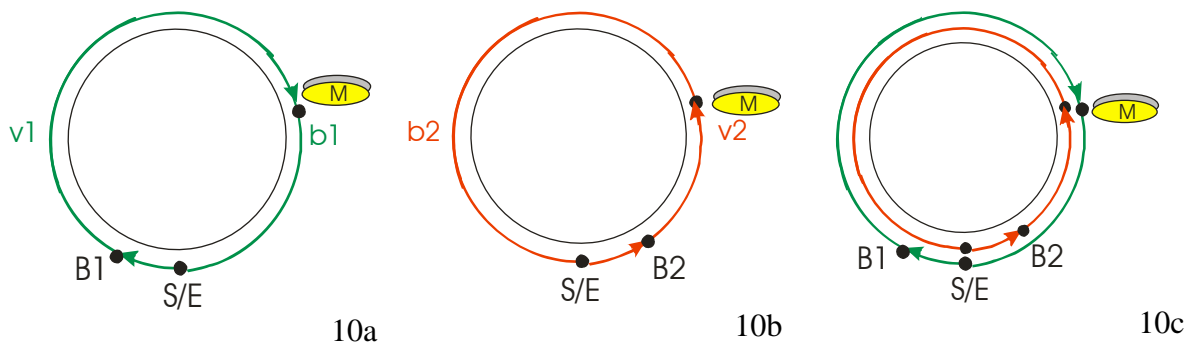
Tenemos (dibujo 8): v_1 , la distancia del objeto en el sentido de las agujas del reloj. Esta va divergiendo de S a través de BS y m_1 a M, y se refleja como la distancia de la imagen b_1 , convergiendo a través de Bs al punto B_1 , frente al ojo del observador E. La parte de la luz que va a S se pierde.

También tenemos: v_2 , la distancia del objeto en sentido contrario a las agujas del reloj, ésta va divergiendo desde S a través de BS directamente a M, y se refleja como la distancia de la imagen b_2 , convergiendo a través de m_1 y Bs al punto B_2 , frente al ojo del observador E. Teóricamente, los puntos B_1 y B_2 pueden coincidir en E, pero también pueden estar justo al lado, o detrás.

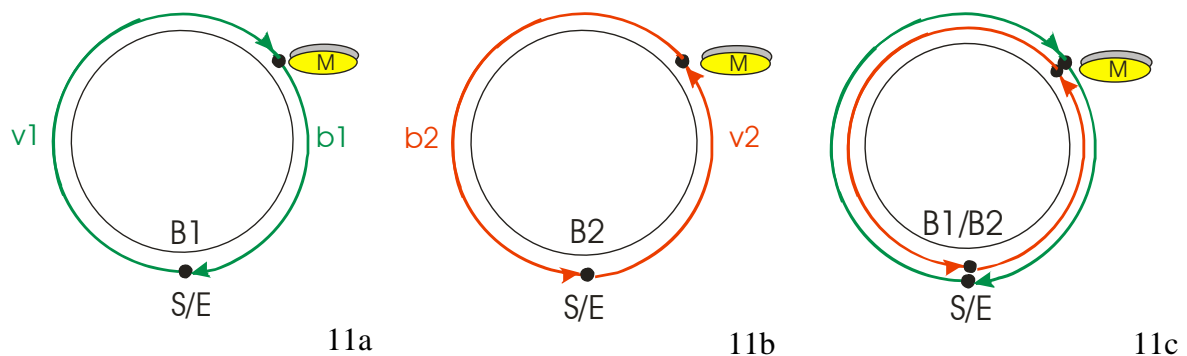
Intentemos explicarlo de forma esquemática como sigue. En el dibujo 9a vemos la fuente de luz S en la parte inferior, desde donde sale el haz de luz v_1 en dirección a las agujas del reloj hacia el espejo M, y que luego se refleja como b_1 en el punto de la imagen B_1 . Sin embargo, vemos que B_1 no llega al punto E. No se recorrió toda la circunferencia circular. El dibujo 9b nos muestra que v_2 llega a M en sentido contrario a las agujas del reloj, y luego converge a través de b_2 al punto imagen B_2 . De nuevo, el punto de la imagen B_2 no coincide con E. Por último, el dibujo 9c trata de resumir ambos dibujos 9a y 9b. Vemos que ambos puntos de la imagen B_1 y B_2 no coinciden, ni llegan al punto E.



Ahora mira el dibujo 10a. La luz comienza desde la S en el sentido de las agujas del reloj. Tras la divergencia y la convergencia, el punto de la imagen B1 cae ahora más allá del punto E. La distancia recorrida es mayor que la circunferencia del círculo. En el dibujo 10b, la luz parte de S en sentido contrario a las agujas del reloj y el punto de la imagen pasa por E después de toda la circunferencia. El dibujo 10c une los dibujos 10a y 10b. Los puntos de imagen B1 y B2 no se encuentran, y caen más allá de E.



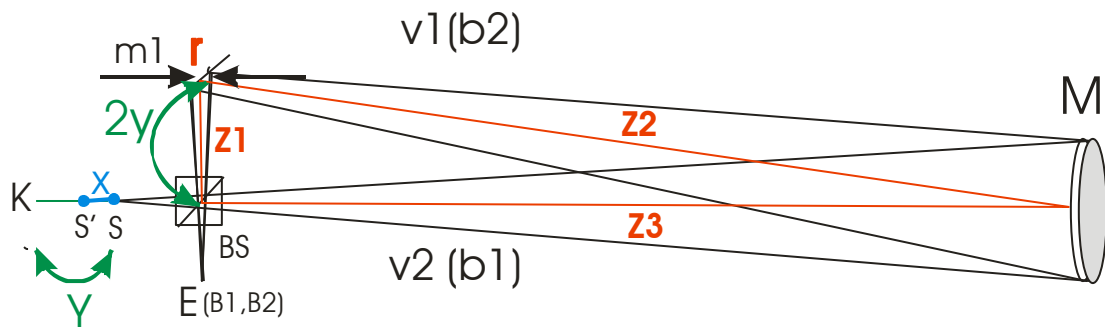
En el dibujo 11a, la luz va divergiendo en sentido horario hacia M, y converge en B1. Este punto converge a E. El dibujo 11b nos muestra la luz en sentido contrario a las agujas del reloj, con B2 también convergiendo a E. El dibujo 11c resume los dibujos 11a y 11b. Ambos puntos, B1 y B2 coinciden entre sí, y esto en E.



La explicación que sigue es un intento de elegir todas las distancias en el montaje básico de forma que, efectivamente, los puntos de imagen B1 y B2 coincidan entre sí en E, es decir, que den lugar a imágenes de interferencia inusuales para el observador. El margen en el que se manifiestan las interferencias es excepcionalmente pequeño. Si, por ejemplo, B1 y B2 están a sólo medio milímetro de distancia, están a mil (!) longitudes de onda de distancia, y en nuestra configuración ya no hay ninguna interferencia.

A continuación, nos adentraremos brevemente en las matemáticas. Simplemente no funciona sin cálculos. Esperemos que el lector deje atrás rápidamente estas pocas líneas y pueda seguir fácilmente el tema principal de este texto.

Así que definimos con más precisión. Lo que prefijamos aquí axiomáticamente puede parecer algo inusual. Sin embargo, son elecciones muy deliberadas y el resultado reflexivo de algunas operaciones algebraicas. Aquí omitiremos esas operaciones propiamente dichas. Nos limitamos a los resultados. Quienes estén interesados en ellos, los encontrarán al final de este texto. Sin embargo, su importancia práctica se pondrá de manifiesto muy pronto. Ilustra esto con el dibujo 12.



12

Fíjate en 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 del rectángulo, Z2 es la hipotenusa y obviamente es 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 corto; $2y = z1 - (z2 - z3)$.

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

Finalmente, x, la distancia de S' a S, viene dada por la fórmula $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$.

Con todos estos datos, intenta definir las distancias de los objetos. Lo conseguimos:

$$v1 = 2*f - y + 2y + x \text{ o } v1 = 2*f + y + x$$

$$v2 = 2*f - y + x$$

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

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

Ilustremos que tenemos los siguientes valores:

$f = 1250, y = 5, x = \sqrt{5^2 + 1250^2} - 1250 \text{ o } 0,01$. Lo conseguimos:

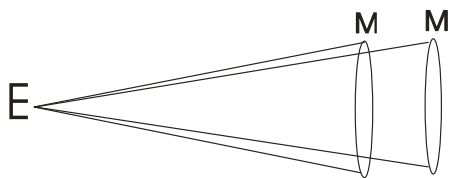
$$v1 = 2500 + 5 + 0,01 \text{ o } 2505,01, \quad b1 = 2505,01 * 1250 / 2505,01 - 1250 \text{ o } 2495,01$$

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

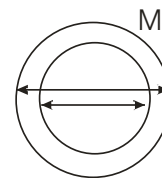
Vemos que con estos valores, $v1 = b2$, y también que $v2 = b1$. La importancia de esto queda inmediatamente clara cuando nos damos cuenta de que $v2 - b1 = 0$, pero también $v1 - b2 = 0$. Esto significa que, teóricamente, para el observador en E, los puntos imagen B1 y B2 coinciden exactamente. Es la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

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

En nuestra configuración básica, la trayectoria de la luz b2 es más larga que la trayectoria de la luz b1. La luz de M que nos llega por b2 ha recorrido un camino más largo que la luz de M que nos llega por b1. De modo que para el ojo, el espejo M está más lejos en el primer caso que en el segundo. Esto nos ilustra el dibujo 13a.



13a



13b

Con los valores dados, esta diferencia mutua de distancia es de 2505,01 - 2495,01 o 10 mm. Parece ser que la superficie del espejo que vemos a través de una trayectoria de luz difiere ligeramente en tamaño en comparación con la superficie del espejo que observamos a través de la otra trayectoria. Precisamente por eso es un interferómetro radial. Esto nos muestra, muy exagerado, el dibujo 13b.

Construye este interferómetro y ajústalo con tanta precisión que casi toda la superficie del espejo esté llena de un color del interferómetro. A continuación, llevamos la mano al camino de la luz. Vemos imágenes como las que se muestran a continuación (14a, 14b, 14c). La mano calienta el aire circundante y esta turbulencia crea un obstáculo para la luz, haciendo que se desvíe. Esto último provoca cambios de color. Vemos volutas de aire caliente que suben constantemente. El conjunto es muy dinámico y nos ofrece un espectáculo fascinante.



14a



14b



14c

Intentamos capturar estas imágenes digitalmente. Sin embargo, nuestra fuente de luz puntual tiene un diámetro de sólo 0,3 mm, el diámetro de una aguja de acupuntura, y es muy tenue. De todos modos, en algunos intentos de hacer fotos, las imágenes son tan pequeñas y ligeras que, al ampliarlas digitalmente, sólo muestran una colección de píxeles demasiado borrosos. Por ello, en este texto preferimos ceñirnos a una representación real en dibujos.

Si consideramos nuestro interferómetro, queda claro que la radialidad disminuye a medida que disminuye la diferencia de longitud entre los dos subhaces. Esto nos permitirá ampliar las bandas de interferencia. Nuestra configuración será entonces aún más sensible. Sin embargo, hay un límite. El espejo plano m1 (véase la Fig. 12) no puede introducirse en Bs. La menor

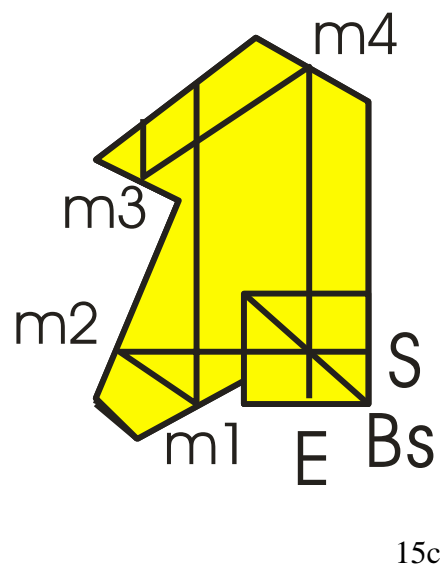
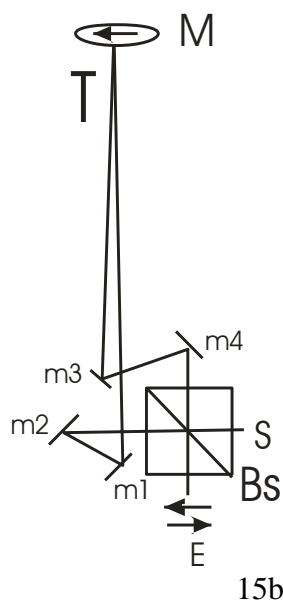
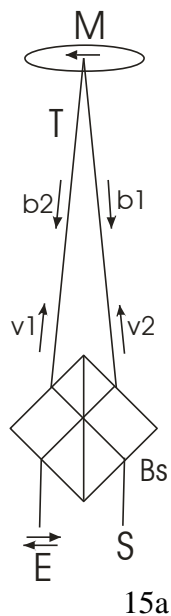
distancia que logramos para 2y fue de 7 mm. Sin embargo, esta diferencia de trayectoria puede eliminarse de otra manera. Queremos explicarlo en un momento.

En resumen, describimos y calculamos un tipo de interferómetro radial. Este es radial y porque, visto desde el observador E, las dos imágenes de M no tienen el mismo tamaño, no el mismo diámetro. Sin embargo, los puntos de la imagen B1 y B2 están mucho más cerca entre sí de lo que se pensaba, por ejemplo, en el conocido experimento de las dos rendijas de Young. Así, se pueden obtener imágenes de interferencia mucho más amplias de forma relativamente sencilla. Nuestro instrumento es tan sensible que muestra el aire ascendente causado por el calor de nuestra mano en muchos colores de interferencia alternados.

4. Una configuración de inversión

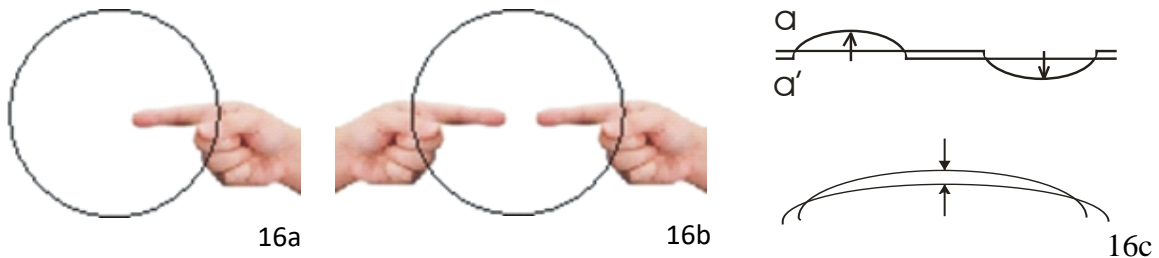
En el primer texto ya se mencionó un tipo de interferómetro de inversión. Aquí profundizaremos en ello. El montaje en la imagen de abajo a la izquierda (15a) nos muestra una inversión con un Bs, como se describe en la literatura. No logramos generar una amplia interferencia con esto. Los haces ya caen demasiado oblicuamente sobre Bs, lo que da lugar a líneas de interferencia verticales, no a una superficie de espejo de un solo color de interferencia.

Así que evitamos este problema con el montaje que se muestra en la imagen central (15b). Para que las trayectorias luminosas distintas sean lo más parecidas posible entre sí, utilizamos un mapa (15c), un detalle del dibujo 15b, en el que las dos trayectorias luminosas podían hacerse casi iguales en longitud, con una diferencia de trayectoria de menos de 1 mm. De este modo, los espejos m1 a m4 podrían colocarse con gran precisión en el lugar adecuado.



El ajuste de todas las piezas en 15b con el láser requiere una gran precisión. En efecto, toda la luz láser debe estar en el mismo plano. Utilizando unos espejos auxiliares planos y un trozo de plástico transparente, comprobamos si los distintos rayos láser se cruzan efectivamente, o si no se limitan a cruzarse a una distancia mutua.

En este interferómetro de inversión, una mitad de la imagen (16a) se mezcla con la imagen especular de la otra mitad (16b). Si no sobrepasamos la línea central del espejo con la mano, una onda perturbada interfiere con otra no perturbada. Imagine la onda perturbada por un arco y la onda no perturbada por una línea horizontal (16c arriba). Su diferencia mutua, indicada por la flecha, es mucho mayor que en un interferómetro radial. El instrumento es por tanto mucho más sensible. Vemos un cambio de color mucho más intenso. Se observa así que en un interferómetro radial (16c abajo) la diferencia entre dos curvas, es menor que la diferencia entre una curva y una recta.



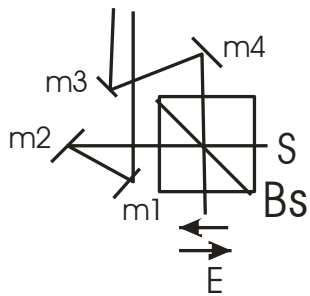
Si colocamos el dedo en la trayectoria de la luz, se obtiene un resultado bastante sorprendente (17). Ya lo describimos en detalle en el primer texto.



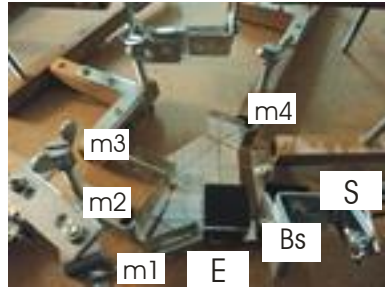
17

Sin embargo, la imagen nunca es estática. Cualquier vibración del banco óptico, por ínfima que sea, es tal que una mitad de la imagen, reacciona de forma "opuesta" a la otra mitad. Aclare esto de la siguiente manera. Mantenemos ambas manos con las puntas de los dedos juntas, sin soltarlas. Si movemos una mano hacia delante o hacia atrás, la otra le sigue simultáneamente. Así es como funciona con las vibraciones en un interferómetro ordinario. No es así en un interferómetro de inversión. Siguiendo con el ejemplo de las manos: cuando hay un choque, una mano se mueve hacia adelante, pero la otra hacia atrás en la misma medida. Y como nuestro banco óptico vibra constantemente -hablamos de movimientos mínimos-, la imagen cambia constantemente y no es fácil mirar con calma lo que se muestra. Son literalmente "instantáneas" de un acontecimiento extremadamente dinámico.

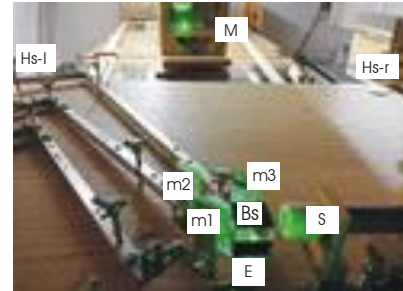
El dibujo 18a nos ofrece un detalle del montaje del 15b. En la imagen 18b, preste atención al espejo vertical m4. En ella vemos la imagen especular de las líneas dibujadas en el mapa. Si ajustamos el espejo m4 de forma que veamos la línea trazada y su imagen especular alineadas, sabremos que el ajuste ya es bastante preciso. Prestamos atención a que toda la luz láser permanezca en el mismo plano. Obviamente, esto se aplica a la alineación de todos los espejos. La foto 18c da una impresión del banco óptico. El espejo M está sobre un carro, que puede acercarse o alejarse con precisión, o deberíamos decir "conducirse", a través de un rayo bajo el banco óptico con tornillos de ajuste.



18a



18b

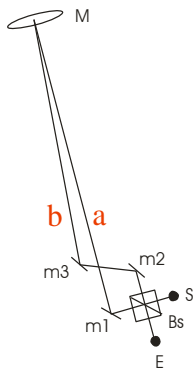


18c

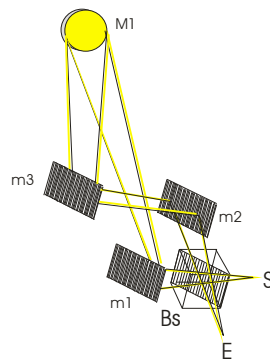
Hasta aquí la descripción de este interferómetro de inversión. Ahora pasemos al siguiente experimento.

5. Una configuración con radialidad = 0

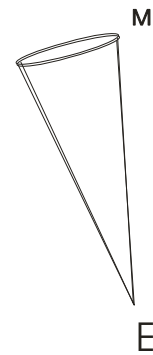
Intentemos hacer más sensible nuestro montaje básico, reduciendo aún más la diferencia de recorrido entre los dos haces parciales. En otras palabras, hacemos que la trayectoria de la luz a o v_1 y la trayectoria de la luz b o v_2 sean igualmente largas. Para ello, añadimos los espejos planos m_2 y m_3 a la configuración básica. Podemos ver que en el dibujo (19a)



19a



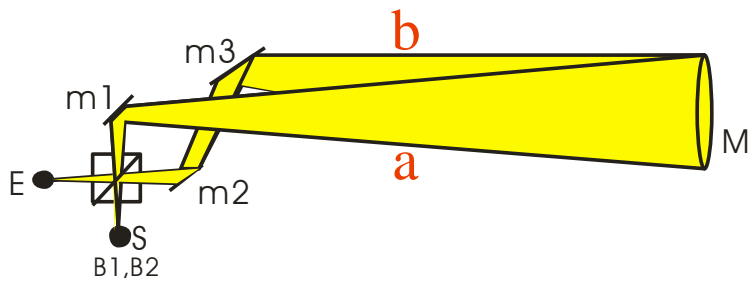
19b



19c

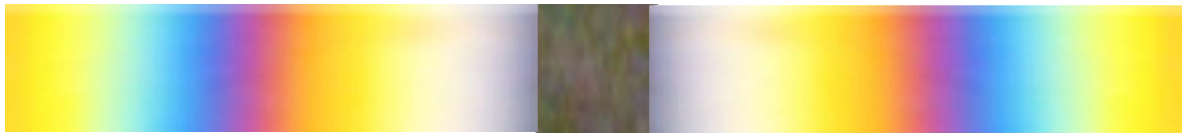
La figura 19b muestra el diagrama divergente y convergente. La figura 19c ilustra que desde E vemos el espejo M a distancias iguales a y b. Es decir, el espejo M se ilumina desde su centro de curvatura K. Así, v_1 , b_1 , v_2 y b_2 se vuelven igualmente largos. Dicho de otro modo, en nuestra fórmula $x = \sqrt{(y^2 + f^2)} - f$, x e y apuntan a 0 y los puntos imagen B1 y B2 coinciden en E. En consecuencia, nuestro montaje ya no es un interferómetro radial. Sin embargo, obtenemos un instrumento excepcionalmente sensible, que esperamos que reproduzca perturbaciones muy pequeñas en la trayectoria de la luz como cambios de color.

Por lo tanto, construya la configuración como se muestra en el dibujo 20 a continuación.



20

Una banda de interferencia bonita y ancha aparece bastante rápido al alinearse. (21).



21

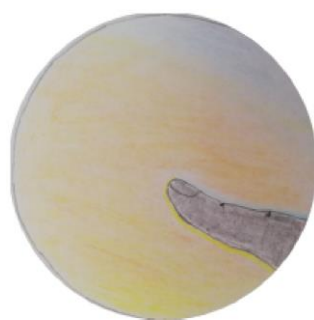
Finalmente, con una alineación extremadamente precisa, se vuelve tan ancha que supera varias veces el diámetro de nuestro espejo. A continuación, podemos ajustar el espejo para que toda su superficie se llene opcionalmente con un solo color de interferencia cada vez. Lo vemos presentado a continuación (22).



Si nos ajustamos a un color de fondo y colocamos la mano en el recorrido de la luz justo delante del espejo, vemos, según el color elegido, lo que se dibuja y colorea abajo (23a, 23b, 23c). Ya no notamos una turbulencia violenta como se muestra, por ejemplo, con el interferómetro invertido (17), o incluso con las imágenes de nuestro montaje básico (14a, 14b, 14c). No, la imagen es ahora bastante estática. Podemos seguir observando tranquilamente.



23a



23b



23c

Por último, ajustamos gradualmente la configuración a la interferencia destructiva (24a), y llevamos el dedo a la "trayectoria de la luz" (24b, 24c).



24a



24b

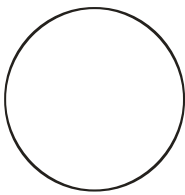


24c

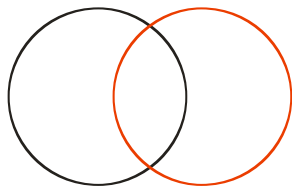
Vemos una banda blanco-amarilla alrededor del dedo. Al parecer, hay "algo", una materia fina, que perturba lo tan sensiblemente destructivo, y posiblemente en ese lugar hace que la interferencia sea incluso constructiva. El hecho de que esa banda quede momentáneamente atrás al mover el dedo de un lado a otro indica que se trata de un fenómeno distinto a la difracción.

6. Young y Newton: dos caras del mismo evento.

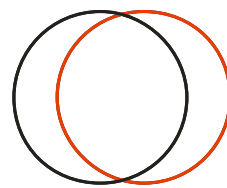
Desliza gradualmente dos transparencias en las que está impreso un círculo una sobre otra. Obtenemos (del 25b al 25d) :



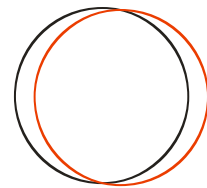
25a



25b



25c

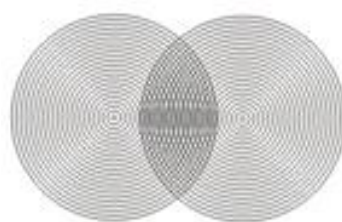


25d

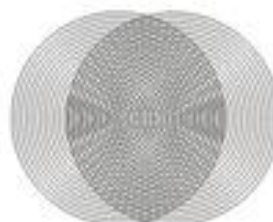
A continuación, deslizamos gradualmente dos transparencias, con una serie de círculos concéntricos impresos en cada transparencia (26a), una sobre otra. Se empiezan a formar patrones bien definidos. Obtenemos (de 26b a 26d) :



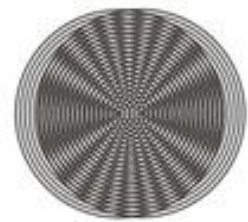
26a



26b



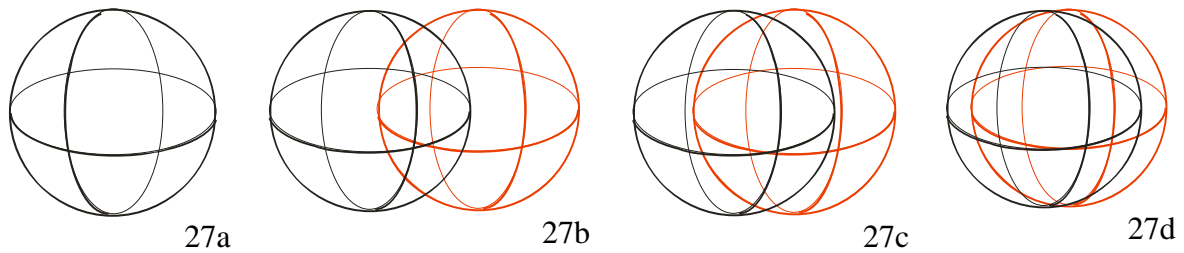
26c



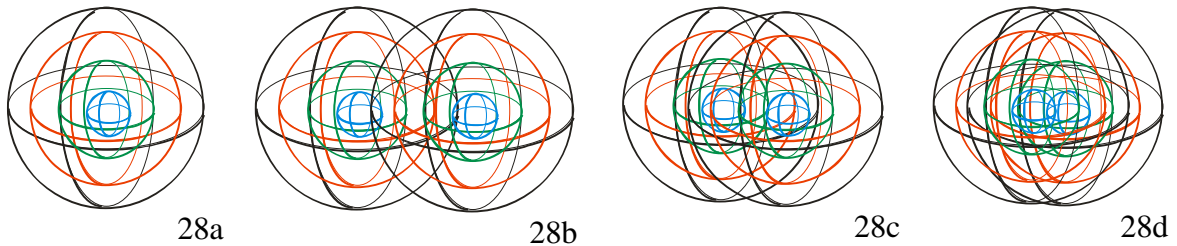
26d

Los patrones oscuros, que se forman con mayor claridad en el dibujo 26d, surgen porque dos curvas, cada una con curvaturas ligeramente diferentes, se tocan e incluso parecen fluir una dentro de la otra por una pieza. Esto hace que parezcan formar un arco ligeramente más grueso juntos.

Ahora imagina que no son círculos, situados en un plano, sino esferas, que tienen una longitud y una anchura, además de una altura (27a). Imagina que poco a poco se van deslizando más y más entre ellos. Obtenemos (de 27b a 27d) :



A continuación, imagina que cada una es un conjunto de cuatro esferas concéntricas (28a). Estas dos secuencias se deslizan gradualmente la una hacia la otra. Obtenemos (de 28b a 28d):

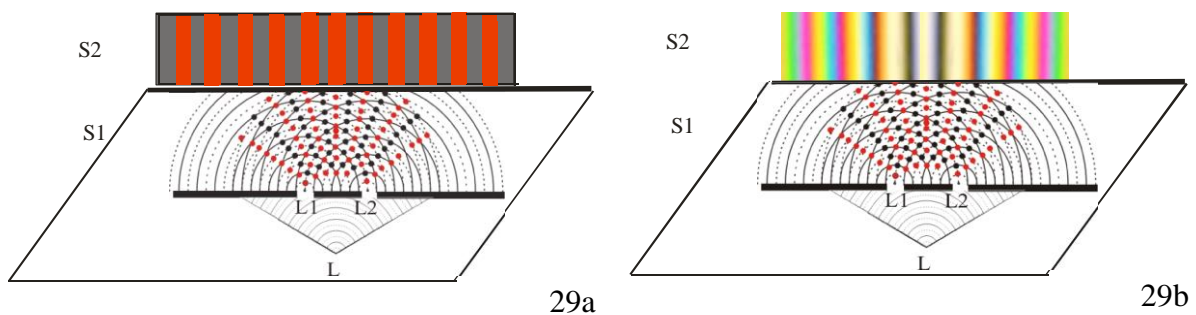


La imagen en papel o digital ofrece una representación estática de la misma. En aras de la claridad, hemos utilizado colores en los dibujos 28a a 28d. Sin embargo, en el caso de las fuentes de luz, imagina que son de un solo color: luz láser monocromática o luz blanca. Esta última es una colección de los colores del arco iris.

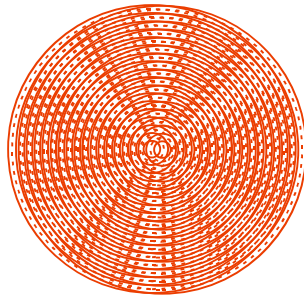
Imaginemos que una de estas series de esferas concéntricas (28a) se expande continua y uniformemente, obviamente a la velocidad de la luz, y que desde el centro se generan continuamente nuevas esferas. Teniendo esto en cuenta, se puede imaginar aproximadamente lo que ocurre con una fuente de luz puntual, por ejemplo, una fina fibra de vidrio, que emite luz en todas las direcciones.

Aunque en nuestros dibujos (28a a 28d) cada punto de luz sigue generando sólo 4 ondas, el panorama ya se complica bastante.

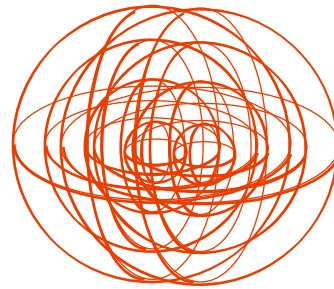
En el primer texto hemos discutido en detalle el experimento de las dos rendijas de Young, y esto tanto para la luz monocromática (por ejemplo, la luz roja del laser), como para la luz blanca. Recordemos los dibujos 31 y 32 del primer texto, que reproducimos aquí de nuevo. Ahora como dibujos 29a y 29b.



Reproducimos a continuación el dibujo 26d, ahora como dibujo 30a, al lado (en 30b) encontramos el dibujo 28d. Ambos, sin embargo, en color rojo.



30a



30b

Ahora, intente imaginar que el dibujo de la izquierda (30a) no es una representación de círculos en un plano, sino una representación espacial de dos conjuntos de esferas concéntricas apretadas entre sí. Si completáramos el dibujo 30b con tantas esferas como las representadas en el dibujo 30a, el dibujo 30b tendría el mismo aspecto que el 30a, incluidas las pautas de interferencia similares.

Recordemos que el ojo no ve las ondas luminosas individuales. Sí que ve sus interferencias. Al igual que en el dibujo 26d los patrones surgen porque partes de dos círculos, cada uno con una curvatura casi similar, se tocan y penetran un poco entre sí, también aquí. Sólo que ahora no se trata de círculos, sino de esferas. Donde dos esferas, con una curvatura casi igual, se tocan y penetran la una en la otra, vemos la cáscara esférica común en ese lugar.

Esto dio lugar a las rayas de interferencia rojas y negras del dibujo 29a, que se marcaron en la pantalla S2. Obsérvese que las fuentes luminosas puntuales L1 y L2 vistas desde el observador L, son adyacentes entre sí.

Sin embargo, ese no es el único punto de vista posible. Los puntos de luz también pueden estar detrás de otros. Intenta aclararlo con el dibujo 31 de abajo. Vemos dos puntos de luz roja A y B, cada uno de los cuales genera una serie de esferas concéntricas.



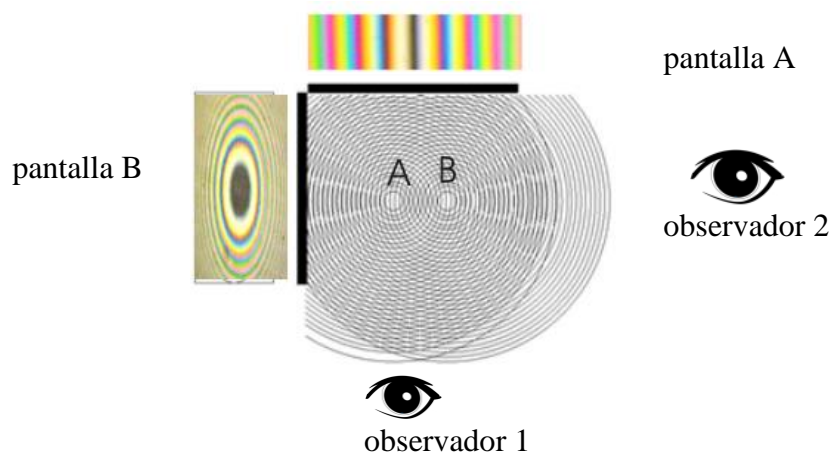
31

Para el observador 1 (abajo), los puntos A y B están próximos entre sí y generan en la pantalla A (arriba) una serie de líneas paralelas rojas y negras, líneas de interferencia constructiva y destructiva, como nos mostró el experimento de Young.

Para el observador 2 (derecha), los puntos A y B no están uno al lado del otro sino detrás y generan en la pantalla B (izquierda) una serie de círculos concéntricos rojos y negros, círculos de interferencia constructiva y destructiva, los conocidos anillos newtonianos. Newton las descubrió pero no pudo explicarlas, porque para él la luz estaba formada por partículas, no por ondas.

El dibujo 31 nos muestra la conexión entre el experimento de las dos rendijas de Young y los anillos de Newton. Son como las dos caras del mismo evento de interferencia. Más aún, si colocamos los dos puntos A y B no al lado o debajo del otro, sino un poco más en diagonal, las curvas se mostrarían en una pantalla, situada entre las pantallas A y B, como una transición entre círculos y líneas. Volveremos a esta importante distinción, la ubicación de los puntos A y B, uno al lado del otro o detrás, más adelante en el texto.

Antes hemos hablado esencialmente de la luz de un color. Sin embargo, trabajamos con luz blanca. Por lo tanto, en nuestras pantallas veremos rayas o círculos de interferencia de colores, como se muestra en el dibujo 32. Esto aclara por qué al principio de nuestros experimentos (dibujos 7a, 7b y 7c) se nos mostraron algunos círculos y líneas, cuyo significado no entendimos al principio.



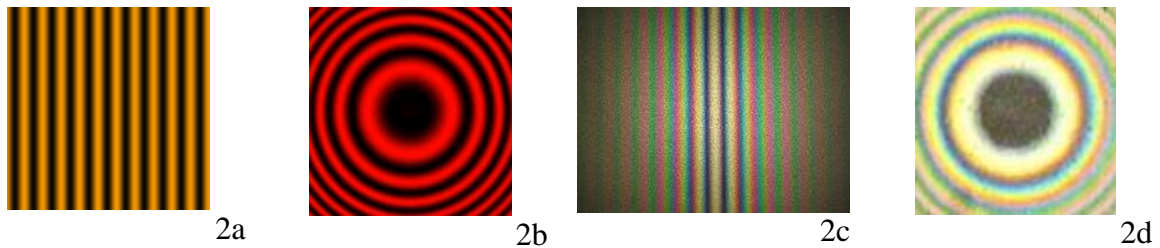
32

Hasta aquí la conexión entre los experimentos de Young y Newton, y esto como las dos caras de un mismo hecho.

7. ¿Y qué más?

Todo esto nos lleva ahora a algunas reflexiones fascinantes sobre el experimento M&M. Lo aclaramos. Recuerda las imágenes 2a a 2d. Los repetimos aquí. Como ya se ha mencionado, el experimento M&M realizado en 1887 mostraba, por un lado, una serie de líneas verticales de interferencia constructiva intercaladas con líneas de interferencia destructiva (dibujos 2a y 2c). Y por otro lado, una serie de círculos de interferencia constructiva intercalados con círculos de interferencia destructiva (dibujos 2b y 2d). Las figuras 2a y 2b muestran la luz de un color. Las figuras 2c y 2d nos muestran la interferencia de la luz blanca.

La figura 2a nos muestra líneas, no bandas anchas. En el centro de la imagen 2c vemos una línea negra, no una banda ancha. En las figuras 2b y 2d, vemos centralmente un círculo de interferencia destructiva. Sin embargo, esto no llena toda la superficie del espejo.



:

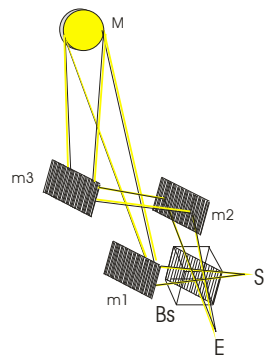
Observando el dibujo 32, que nos mostraba la conexión entre el experimento de Young y los anillos de Newton, ¿podemos suponer entonces que los dos puntos B1 y B2, para el "observador" en E "no coinciden realmente", sino que por el contrario, en lo que respecta a las líneas, se encuentran uno *al lado del otro*? Y en el caso de los círculos (2b y 2d), los puntos de la imagen B1 y B2 tampoco coinciden, sino que se encuentran *uno detrás del otro*. Si no, el círculo oscuro llenaría toda la superficie del espejo.

Entonces se puede plantear la pregunta de si el experimento M&M, con nuestra técnica actual, se puede afinar para que los dos puntos de la imagen en E no se encuentren uno al lado del otro o detrás de él, sino que coincidan (casi). Esto es evidente, al menos, en los experimentos con la llamada "interferometría de nulidad" o también en la precisión con la que se alinean, por ejemplo, los 18 segmentos del telescopio James Webb. Lo aclaramos.

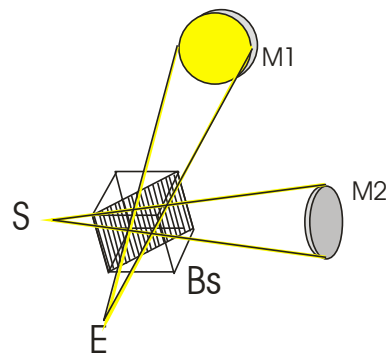
"Interferometría de nulidad". Piensa en el mundo estelar. La cuestión de si existen otros planetas como la Tierra en otros lugares del universo es muy actual en nuestros días. Sin embargo, encontrar esos planetas no es tan fácil. Si están demasiado lejos de una estrella, son demasiado débiles. Si están demasiado cerca, la intensidad de la luz cegadora de este objeto celeste impide observar el planeta. Por eso se utilizan, entre otras cosas, las interferencias destructivas: los haces de luz pueden, en determinadas condiciones, extinguirse. Ya lo hemos explicado. La luz de dos telescopios muy próximos y equivalentes sintonizados con la misma estrella puede unirse, pero con una diferencia de media longitud de onda o un múltiplo no apareado. Así, la luz de las estrellas se neutraliza. Pero esto no se aplica necesariamente a la luz del planeta situado cerca de esa estrella. En conclusión, la luz de la estrella se atenúa o se apaga, pero la del planeta, que está a otra distancia de los telescopios, no. Así, este último se hace visible.

También encontramos esta gran precisión en la sintonización en *el telescopio James Webb*. Los 18 segmentos hexagonales individuales del espejo principal están sintonizados entre sí de tal manera que la luz de estos segmentos puede alinearse al nanómetro más cercano (1×10^{-9} m, o una millonésima de milímetro (!)).

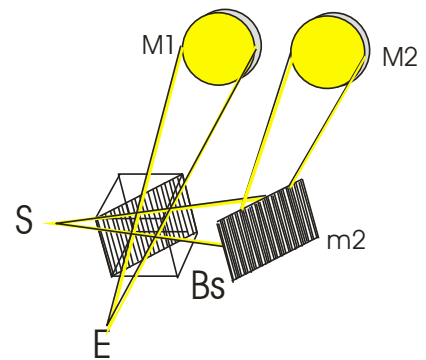
Sin embargo, la pregunta que surge es: ¿quién necesita hoy en día un experimento de M&M realizado con mucha más precisión? Quizás nadie, al menos no en la configuración de espejo plano. Pero qué pasa si se repite con gran precisión, no con luz láser, sino con luz blanca, como se muestra en el montaje con un espejo hueco y un recorrido de luz igual (33a), o con dos espejos huecos (33b o 33c).



33a



33b



33c

¿Y qué pasa si uno logra la interferencia destructiva también aquí, y luego lleva la mano al camino de la luz? O pensamos más allá. ¿Y si se trabaja con espejos más grandes? ¿Qué se mostrará entonces del hombre? Por ahora, estas cuestiones siguen siendo especialmente fascinantes.

Veamos el dibujo 33b. Si, por ejemplo, la mano se coloca delante de uno de los espejos M1 o M2, entonces en E se mezclan una imagen distorsionada y una no distorsionada. Nosotros mismos conseguimos algo parecido con el montaje de inversión (34) que ya hemos comentado en el punto 4 (y en el dibujo 17).

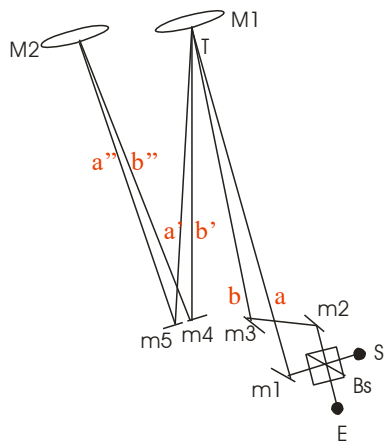


34

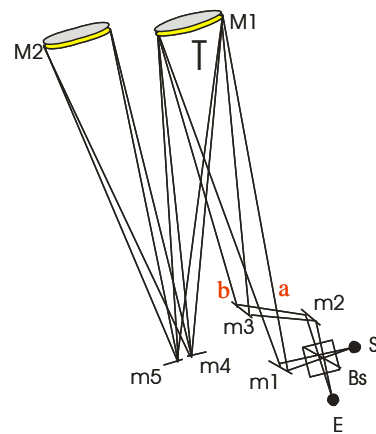
Como se ha mencionado, en ese tipo de interferómetro, una mitad de la imagen se mezcla con la imagen especular de la otra mitad. Si no sobrepasamos la línea central del espejo con la mano, una onda perturbada interfiere con otra no perturbada. Esto provoca turbulencias muy violentas y una imagen inestable que vibra continuamente.

Con la tecnología actual, debería ser posible eliminar las vibraciones. Si se construye la disposición como se indica en 33b (o en 33c), entonces ya no se tiene una imagen con la imagen del espejo, sino una imagen única que interfiere con una imagen no perturbada. De nuevo, la pregunta sigue siendo qué aparecerá si la mano es llevada al camino de la luz. ¿Y si, además, se ajusta este interferómetro para la interferencia destructiva?

En el montaje 36a, se añadió un segundo espejo M2. Se reconoce en esto una configuración derivada de 33a. Sólo hemos mostrado las líneas láser. El dibujo 36b muestra la misma configuración, pero ahora con haces divergentes y convergentes. Si se piensa un momento en ellas, se observa que una perturbación (turbulencia T, por ejemplo, la mano en la trayectoria de la luz de M1) se atraviesa una vez más, por lo que las perturbaciones se acumulan y el instrumento se vuelve doblemente sensible. Los espejos m4 y m5 no están en realidad al lado, sino justo por encima de m2 y m3, por lo que el paralaje se vuelve insignificante. Construimos esta configuración, pero no conseguimos ajustarlos sin vibraciones.



36a



36b

Aparentemente, se pueden seguir ideando variaciones... Sin embargo, estos últimos montajes superan con creces los límites de lo posible para un aficionado. Reflexionando sobre todos nuestros tejemanejes, más de una vez hemos pensado que con la interferencia de la luz blanca todavía hay todo un campo abierto a la ciencia y mucho por descubrir.

8. Para concluir.

El experimento M&M hizo que Einstein decidiera no considerar un éter cuya existencia no se puede demostrar. Después de todos nuestros experimentos, ¿es ésta realmente la última palabra y la única decisión posible? ¿Sería una hipótesis demasiado atrevida suponer que con un experimento de M&M mucho más cuidadoso, y con luz blanca, se podría demostrar, sin embargo, algo de la existencia de una sustancia fina? Y si es así, ¿no sería un curioso giro del destino? El mismo experimento proporciona primero una negación y luego una confirmación de lo que se suponía al principio....

El párrafo inicial de nuestro texto, la Parte I, dice: "En casi todos los tiempos y en casi todas las culturas no occidentales, se escuchan y se leen testimonios de personas que afirman que no sólo tenemos un cuerpo biológico, sino que también tenemos un conjunto de cuerpos sutiles, que en conjunto forman la llamada aura. Se dice que se encuentra en varias capas más finas alrededor del cuerpo biológico".

Aunque no se distribuya uniformemente como se supone en el experimento de los M&M, la idea de la existencia de una sustancia fina es propia de toda nuestra historia cultural.

Este texto pretende abordar la existencia o inexistencia del "polvo fino" de manera científica. Rechazar cualquier investigación sobre este tema a priori no mostraría realmente una actitud científica. Qué hay de malo en formular una hipótesis, idear un experimento para investigar esa hipótesis, realizar el experimento y aceptar los resultados: verificación o falsificación. Nos parece que hemos sido fieles a este método en nuestros experimentos.

Posiblemente, al hacerlo, algunos de los resultados van en contra de la mentalidad actual. ¿Queremos ver la realidad a través de las lentes de nuestros prejuicios? ¿O queremos ajustar nuestra mentalidad a lo que es la realidad? La historia nos enseña que cuando se emiten juicios que van en contra de la opinión predominante, no es malo seguir siendo prudente. Remítase,

por ejemplo, a J. Margolis, *Ces savants excommuniés*, y límitese a una muestra de la traducción de un artículo, publicado en el Sunday Times.

"Antes de que su teoría fuera aceptada, L. Pasteur (1822/1895), el fundador de la microbiología, y A. Einstein (1879/1955), conocido por su teoría de la relatividad, fueron descartados como "desviados peligrosos". Cuando el inventor Th. Edison (1847/1931) mostró su bombilla eléctrica, fue acusado de "mistificación". A los hermanos Wilbur (1867/1912) y Orville (1871/1948) Wright, que habían realizado por primera vez en la historia un vuelo motorizado con un avión construido por ellos mismos, no se les creyó ni siquiera durante dos años, "pues la ciencia había determinado que una máquina, si pesa más que el aire, no puede volar". Cuando el geólogo Alfred Wegener (1880 /1930), recitó la teoría sobre la "deriva" de las tierras sólidas, el movimiento que hacen los continentes en relación con los demás, fue ridiculizado". Así es el Sunday Times.

Cabe añadir, entre otras cosas, que G. Cantor (1845/1918), el fundador de la moderna teoría de conjuntos, corrió la misma suerte y murió en una institución mental, medio loco de incompreensión. Su trabajo es ahora ampliamente aceptado y apreciado. Copérnico (1473/1543) no publicó sus descubrimientos hasta el final de su vida por miedo a las sanciones. Galilei (1564/1642) fue condenado en 1633 por afirmar que era el sol el que giraba alrededor de la tierra y no al revés. Su petición de probar sus afirmaciones en su visor fue ignorada. Sólo en 1978 (!) fue rehabilitado por las autoridades religiosas. Cualquiera que se informe un poco más puede añadir algo a esas valoraciones erróneas y descubrirá que no siempre es fácil mantener una opinión que va en contra de la mentalidad imperante.

Lo que ha guiado toda nuestra experimentación es la firme creencia de que existe el aura y, por tanto, una sustancia fina. Como ya se ha mencionado, los sensibles afirman sentir algo de esta sustancia, los videntes afirman verla y varios magos afirman además poder manipularla, por ejemplo, para lograr curas con ella. Se olvida con demasiada facilidad, pero una persona con educación crítica encuentra un uso responsable además de los numerosos abusos. Numerosas enfermedades (cáncer, ciática...) se manifiestan, según los que pueden percibir esto clarividentemente, como una mancha oscura en el aura, una mancha que continúa gradualmente su repercusión, su efecto patógeno, en el cuerpo biológico.

Aquellos que, además, pueden percibir manéticamente el efecto de fuerza energética de una oración, como una corriente de miríadas de puntos de luz extremadamente finos, afirman que se trata de una afluencia de una fina energía material curativa que amenaza y -al menos en parte- destruye las energías oscuras, patógenas. La creencia, la profunda convicción de que hay una realidad implicada en estas hipótesis, bien podría ser una idea fuerza para no descuidar ninguna investigación física en este vasto campo. Dejemos que el avance de la ciencia y el tiempo aporten claridad a esto.

¿Podemos concluir todo esto con el párrafo final de nuestro primer texto? "Posiblemente, todos nuestros experimentos y reflexiones puedan impulsar nuevas investigaciones a un nivel superior y profesional. La pregunta sigue siendo: qué se mostraría si telescopios más grandes, con espejos de, digamos, 2 metros de diámetro o más, y con una precisión incomparablemente mejor que la nuestra, pusieran literalmente a todo el hombre en el punto de mira. ¿Saldrán entonces a la luz otras perspectivas, posiblemente inéditas, sobre nosotros los humanos, literalmente? Y si es así, ¿enriquecerá tal posibilidad nuestra visión de nosotros mismos y de la

vida, científica, filosófica y religiosamente? Sin duda, siguen siendo preguntas extremadamente fascinantes e intrigantes"

Noviembre de 2022

Referencias

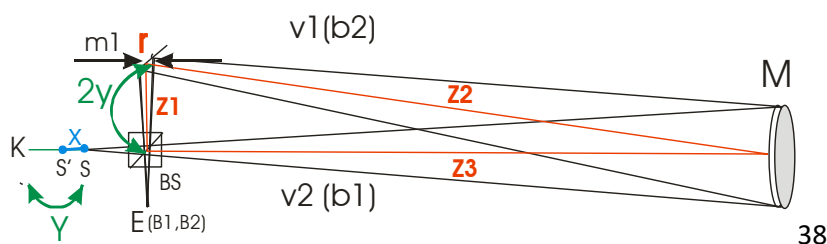
- 2a: <https://demonstrations.wolfram.com/MichelsonInterferometerWithEquallySpacedFringes/>
 2b: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson-Morley_experiment_conducted_with_white_light.png
 2c: https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%20%80%93Morley_experiment
 2d: <https://sites.google.com/site/puenggphysics/home/Unit-II/newtons-ring>

Tras un primer texto exploratorio, esta fue la segunda parte, que pretendía centrarse principalmente en el experimento M&M. En una tercera parte, la atención no se centra tanto en el contenido científico, sino que nos adentraremos más en los aspectos filosóficos y religiosos de la existencia o inexistencia del "polvo fino".

Finalmente: como se anunció, damos a continuación la elaboración algebraica que conduce a la fórmula: $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$

9. La elaboración algebraica.

9. La elaboración algebraica.



Pensando en la fuente de luz puntual en S', tratamos de definir algebraicamente las dos distancias de los objetos. Obtenemos:

v_1 , la distancia del objeto en el sentido de las agujas del reloj, es igual a la distancia de S' a S, luego a B, m_1 y M, o bien: $v_1 = 2*f - (y - x) + 2*y = 2*f + y + x$. (1)

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

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

Para b_2 , la segunda distancia de la imagen, perteneciente a v_2 , y que pasa de M a través de m_1 y B hacia E encontramos:

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

A continuación, viendo en el dibujo dónde se encuentra b_1 , encontramos que el camino disponible para b_1 es igual a v_2 . Así que el punto de la imagen B1 (la letra mayúscula para distinguirla de la minúscula b_1 , la distancia de la imagen) estará a $b_1 - v_2$ de distancia de E, o:

$$B1 = b_1 - v_2$$

Viendo de forma totalmente análoga dónde se encuentra b_2 , observamos que el camino disponible es igual a v_1 . Por tanto, el punto B2 se encontrará a $b_2 - v_1$ de E de distancia.

$$B2 = b_2 - v_1$$

Encontramos la distancia mutua D entre los dos puntos de la imagen B1 y B2 haciendo la diferencia entre estos dos últimos valores. Lo conseguimos:

$$D = B2 - B1 = (b_2 - v_1) - (b_1 - v_2) = (b_2 - b_1) - (v_1 - v_2) \quad (5)$$

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

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

De modo que podemos reescribir (5) como $D = (b_2 - b_1) + 2 * y$ (7)

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

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

Ahora elaboramos esta ecuación con más detalle.

$$= (((2f^2 - fy + fx) * (f + y + x) - (2f^2 + fy + fx) * (f - y + x)) / ((f - y + x) * (f + y + x))) + 2y$$

$$= (2f^3 + 2f^2y + 2f^2x - f^2y^2 - fyx + f^2x + fyx + fx^2) / ((f + y + x) * (f - y + x)) -$$

$$(2f^3 - 2f^2y + 2f^2x + f^2y - fy^2 + fyx - f^2x - fyx + fx^2) / ((f + y + x) * (f - y - x)) - 2 * y$$

$$= (2f^2y / ((f + y + x) * (f - y - x))) - 2y$$

$$= (2f^2y / (f^2 - fy + fx + fy - y^2 + yx + fx - yx + x^2)) - 2y$$

$$= (2f^2y / (f^2 + 2fx + x^2 - y^2)) - 2y$$

$$\text{o } D = (2f^2y / ((f + x)^2 - y^2)) - 2y \quad (8)$$

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 y y del desplazamiento radial x de nuestra fuente de luz puntual.

En esta expresión, dejemos que x aspire a 0, y trabajando más allá obtenemos

$$D = (2f^2y / (f^2 - y^2)) - 2y \quad D = (2f^2y - 2y(f^2 - y^2)) / (f^2 - y^2)$$

$$D = (2f^2y - 2yf^2 + 2y^3) / (f^2 - y^2) \quad D = 2y^3 / (f^2 - y^2)$$

Vemos así que el valor de D disminuye a medida que el valor de y disminuye y/o el valor de f aumenta. Por lo tanto, si queremos acercar los puntos de la imagen B1 y B2 en $x = 0$, tendremos que hacer que las distancias del objeto v_1 y v_2 sean lo más parecidas posible y trabajar con espejos con focos largos.

La importancia de un valor D pequeño quedará clara en la siguiente sección, donde se demostrará que entonces tenemos una mayor latitud mecánica a la hora de 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 x, porque este valor puede cambiarse más fácilmente en una configuración moviendo la fuente de luz hacia delante o hacia atrás. Si lo calculamos, partiendo de la ecuación dada en (8), encontramos:

$$D = (2f^2y / ((f+x)^2 - y^2)) - 2y, \text{ o: } (2f^2y / ((f+x)^2 - y^2)) - 2y = 0$$

y trabajar más a fondo:

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

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

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

Con esta última fórmula, tenemos lo solicitado; un valor cero para D en función de x. Así, si x cumple la condición descrita anteriormente, los dos puntos de la imagen B1 y B2 deberían coincidir prácticamente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no es tanto la coincidencia lo que pretendemos. Si se cubren completamente, no hay ninguna interferencia. Queremos comprobar si pueden acercarse mucho y qué hay que hacer para ello, en la creencia de que, después de todo, la práctica no es un reflejo exacto de estos resultados teóricos. :