

Figura 3. Gráfica de  $h$  frente a  $t$ .

grado de precisión aceptable, es un magnífico ejercicio para el estudiante. Le obliga a realizar análisis y a criticar resultados, ejercicios que influirán positivamente en su formación.

Por otra parte, nosotros concebimos el experimento casero como un pequeño trabajo de investigación en el que no se analicen solamente aspectos cualitativos, sino en el que se trate de obtener la máxima precisión en los resultados cuantitativos, utilizando para ello dispositivos de bajo coste.

**Manuel Yuste Llandres**  
**Carmen Carreras Béjar**

*Dpto. de Física de los Materiales*

## Experimento histórico: El experimento de Michelson-Morley de 1887

### INTRODUCCIÓN

Desde el triunfo de la Teoría Electromagnética de Maxwell, que permitió asignar a la luz una naturaleza ondulatoria consistente, en la Física se planteó un problema muy importante: determinar la estructura del medio que, en el vacío, era el soporte de estas ondas. Se

le denominó *éter* y se dedicaron grandes esfuerzos a descubrir su estructura<sup>1</sup>. Todos ellos fracasaron, pero del análisis de uno de estos fracasos surgió, en 1905, la Teoría de la Relatividad Especial de Albert Einstein (1879-1955), que tanta influencia ha tenido en el desarrollo posterior del pensamiento científico y en el conocimiento de la estructura del universo.

La cuestión es la siguiente. Cuando en 1725 el astrónomo inglés James Bradley (1693-1762) trataba de determinar la distancia a una estrella, se dio cuenta de que las denominadas *estrellas fijas* (estrellas muy alejadas de la Tierra, que los astrónomos tomaban como puntos de referencia para fijar sus direcciones) en realidad no parecían tales. Su posición cambiaba describiendo un pequeño círculo cuando el planeta giraba en torno al Sol. A este fenómeno se le denominó *aberración estelar* y fue interpretado más tarde por el físico francés Augustin Jean Fresnel (1788-1827) admitiendo que el éter se hallaba en reposo absoluto. Esto quería decir que la Tierra se movía respecto al éter con una determinada velocidad que, para un primer análisis, supusieron que era su velocidad de traslación alrededor del Sol.

En 1879, el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), poco antes de su muerte, sugirió que el movimiento de la Tierra respecto al éter podía ponerse en evidencia mediante procedimientos interferométricos. El físico estadounidense Albert Abraham Michelson (1852-1931) se puso a la tarea utilizando para ello el interferómetro de su invención. En un primer intento no pudo constatar movimiento alguno de la Tierra respecto al éter, pero el físico teórico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) criticó este resultado aduciendo que el cálculo realizado por Michelson respecto al desfase de las ondas en el interferómetro estaba equivocado. Éste último corrigió el error y, junto con Edward Williams Morley (1838-1923), proyectó y realizó un nuevo experimento en 1887, en Cleveland (Ohio), en el que se volvía a encontrar un resultado negativo, pero esta vez con mayor seguridad. El experimento se hizo famoso y ha pasado a la Historia como uno de los experimentos clásicos en los que el ingenio resolvió de manera elegante los problemas prácticos. Veamos cómo lo hicieron.

### EL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

El interferómetro de Michelson viene esquematizado en la Figura 1.

Un rayo de luz procedente de la fuente L incide en el punto O sobre una lámina semitransparente S, que lo divide en dos rayos de igual intensidad: el rayo n.º 1, que atraviesa la lámina, y el rayo n.º 2 que se refleja en ella.

<sup>1</sup> Incluso el químico ruso Dimitri Ivánovich Mendeléiev (1834-1907) propuso un lugar para el elemento éter en su sistema periódico.

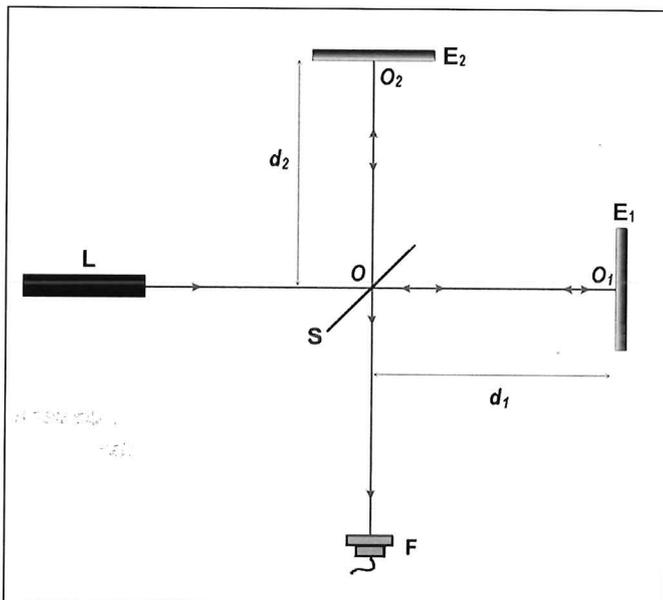


Figura 1. Esquema de un interferómetro de Michelson.

El rayo nº 1 camina hasta alcanzar el espejo  $E_1$ , se refleja en él, vuelve sobre el punto  $O$  y, allí, parte se transmite hacia la fuente  $L$  y parte se refleja hacia el fotómetro  $F$ . El rayo nº 2 llega a  $E_2$ , se refleja y vuelve hacia  $O$ , donde parte se refleja hacia la fuente  $L$  y parte se transmite hacia el fotómetro.

Las partes de ambos rayos que llegan a  $F$  interfieren allí. La intensidad debida a estas interferencias depende del desfase  $\delta$  que se ha producido por la diferencia  $\Delta$  de los caminos ópticos recorridos por los rayos en ambos brazos desde que salieron del punto  $O$ . Se entiende por camino óptico de la luz en un brazo del interferómetro a la distancia que hubiera recorrido en el éter (vacío) en el mismo tiempo que ha invertido en recorrer dicho brazo. Con este convenio, el desfase es:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación luminosa utilizada.

La intensidad luminosa  $I$  sobre el fotómetro viene dada por la siguiente expresión:

$$I = 2 I_0 (1 + \cos \delta)$$

donde  $I_0$  es el valor de la intensidad que mediría el fotómetro cuando solamente llegase a él uno de los rayos del interferómetro<sup>2</sup>. Según sea el valor del coseno del desfase  $\delta$  obtendremos distintos valores de la intensidad (siempre positivos). En particular, cuando  $\cos \delta = 1$ , obtendremos un máximo para la intensidad:  $I_{\max} = 4I_0$ . Por el contrario, cuando  $\cos \delta = -1$ , obtendremos un mínimo:  $I_{\min} = 0$ . Todos los valores intermedios de la intensidad pueden ser obtenidos sin más que hacer cam-

biar el desfase  $\delta$  entre los dos rayos, es decir, haciendo variar la diferencia  $\Delta$  de caminos ópticos. En la Figura 2 se indica la variación de  $I/I_0$  en función del camino óptico  $\Delta$  medido en longitudes de onda  $\lambda$ .

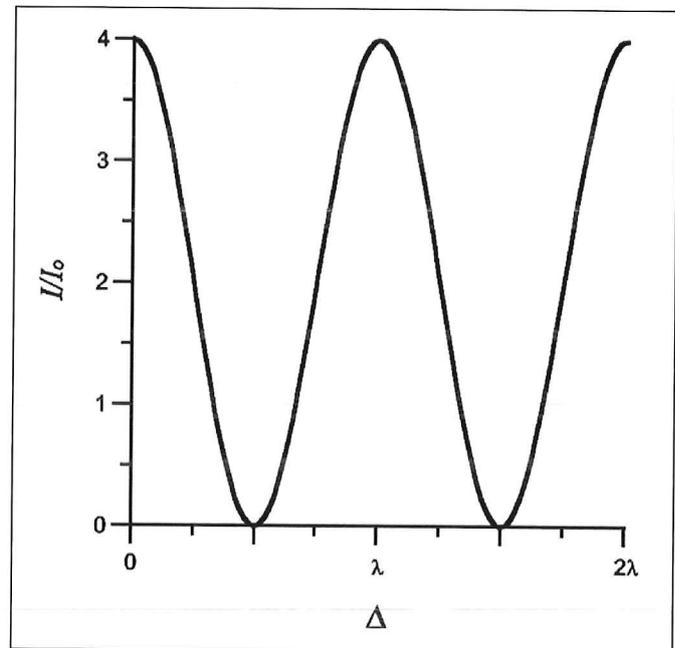


Figura 2. Variación de  $I/I_0$  frente a  $\Delta$

Como puede verse, variaciones en el camino óptico de media longitud de onda provocan el paso de un valor máximo a un valor mínimo en la intensidad, por lo que la medida de ésta permite detectar diferencias de camino óptico inferiores a la centésima de  $\lambda$ . Como el valor de la longitud de onda en la zona visible del espectro se encuentra en torno a  $0,5 \mu\text{m}$ , este método permite determinar variaciones muy pequeñas de los caminos recorridos por la luz.

En estas variaciones puede influir la velocidad de la Tierra respecto al éter fijo. Con esta esperanza, Michelson y Morley dispusieron el interferómetro de manera que se pudiera dar un giro horizontal de  $360^\circ$  a todo el sistema de forma solidaria. Así, cuando el rayo nº 1 fuera paralelo a la proyección  $\nu$  de la velocidad de la Tierra respecto al éter sobre el plano horizontal del lugar, se obtendría un desfase, que llamaremos  $\delta_{\parallel}$ , que sería, en general, diferente del desfase  $\delta_{\perp}$  que se produciría cuando fuera perpendicular (el rayo nº 2 paralelo a  $\nu$ ). Si los cosenos de ambos desfases fueran distintos, también lo serían las intensidades  $I_{\parallel}$  e  $I_{\perp}$  correspondientes, lo que permitiría determinar la velocidad de la Tierra respecto al éter.

Supongamos, por un momento, que se coloca el aparato en la disposición paralela ( $\parallel$ ). Si el haz luminoso que incide sobre la lámina  $S$  fuera rigurosamente paralelo, los planos de los espejos  $E_1$  y  $E_2$  fueran estrictamente perpendiculares entre sí y la dicha lámina separadora formara un ángulo de  $45^\circ$  con ellos, la interferencia en la pantalla de observación (donde se encuentra el fotómetro) se produciría entre dos frentes

<sup>2</sup> Cuando, por ejemplo, se hubiera interrumpido artificialmente el otro.

de onda planos, paralelos entre sí y entre los cuales existiría un desfase  $\delta_1$ . La pantalla aparecería uniformemente iluminada, más o menos intensamente según el valor del coseno del desfase. Si desplazamos el espejo  $E_2$  paralelamente a sí mismo con ayuda de un tornillo micrométrico, la longitud  $d_2$  de su brazo (ver Figura 1) cambiará, por lo que haríamos cambiar también al desfase y se observaría una variación en la iluminación de la pantalla, que nos permitiría determinar la variación del camino óptico con ayuda del fotómetro.

En la época de Michelson y Morley no se disponía de fotómetros capaces de medir con precisión la intensidad de la luz, por lo que utilizaron otro método para determinar estas pequeñas variaciones de distancia. Consistía éste en observar el "desplazamiento" de las franjas de interferencia que se producen en el plano del fotómetro, utilizando para ello un pequeño antejo que se colocaba en su lugar.

En la práctica es muy difícil obtener haces de rayos perfectamente paralelos y colocar los espejos de manera que sean exactamente perpendiculares. Esto hace que, en general, las ondas que interfieren sean esféricas (por lo que en el campo del antejo se observan anillos concéntricos brillantes y oscuros) o, en el mejor de los casos, que sean frentes casi planos, pero formando un pequeño ángulo entre sí. En este último caso (que es el más favorable para la observación que nos ocupa), en el campo del antejo aparecen franjas brillantes y oscuras (ver Figura 3), paralelas a la intersección de los frentes de onda planos, y cuya anchura es tanto mayor cuanto menor es el ángulo que forman los frentes que interfieren.

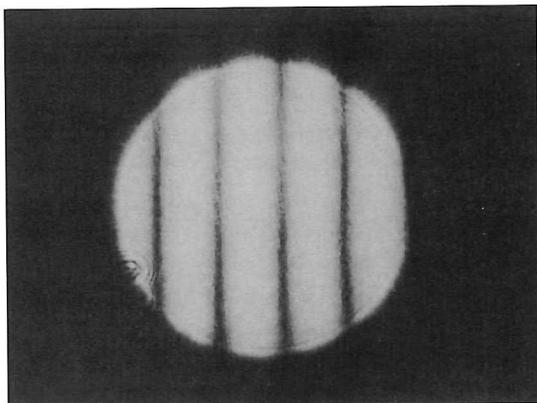


Figura 3. Franjas de interferencia.

La aparición de estas franjas es debida a que ahora el desfase entre las dos ondas no es el mismo en todo el plano de observación. Si accionamos sobre el tornillo micrométrico del espejo  $E_2$ , los desfases cambian aproximadamente de la misma manera en todo el plano, con el consiguiente cambio de la intensidad luminosa en cada uno de sus puntos. Esto hace que donde había una línea brillante pueda aparecer ahora una línea oscura, produciendo el efecto de desplazamiento de las franjas. El antejo de que disponían Michelson y Morley tenía un par de hilillos cruzados (retículo) en su campo de observación, que podía ser desplazado para situarlo sobre el centro (máximo) de una de las franjas brillantes. Hecha

esta operación, se fijaba el retículo y, si la franja se movía, se podía determinar su desplazamiento. Si delante del retículo desfilaba una franja completa, significaba que el desfase había cambiado en  $2\pi$ . Es decir, se había introducido una diferencia de camino óptico igual a una longitud de onda  $\lambda$ .

Esta es la forma en que se disponían a trabajar Michelson y Morley. Colocarían primero el interferómetro en la configuración paralela, harían aparecer las franjas de interferencia y ajustarían el retículo del antejo de manera que se situara en un máximo. Acto seguido, harían girar  $90^\circ$  todo el sistema y medirían el desplazamiento de la franja seleccionada. A partir de este desplazamiento determinarían el cambio en el desfase y de éste deducirían la velocidad de la Tierra respecto al éter.

### CÁLCULO DEL DESFASE $\delta$

Una vez descrito el método de medida vamos a calcular el desfase  $\delta$ . Para ello precisaremos un poco más las hipótesis de Michelson y Morley.

En primer lugar suponen que el éter luminífero está en reposo absoluto y que es isótropo. Es decir, que la velocidad  $c$  de la luz respecto a un sistema de ejes fijo asociado a dicho espacio tiene el mismo módulo en todas direcciones.

En segundo lugar suponen que durante el tiempo en que realizan una rotación del dispositivo (algunos minutos) el eje vertical del lugar donde se encuentran (Cleveland) no cambia de dirección<sup>3</sup>. Esto permite escoger un sistema de ejes fijos  $\{X, Y\}$  para el éter sobre el plano horizontal del lugar. Tomaremos, por comodidad, el eje  $X$  paralelo a la proyección  $v$  de la velocidad de la Tierra respecto al éter sobre dicho plano horizontal (ver Figura 4).

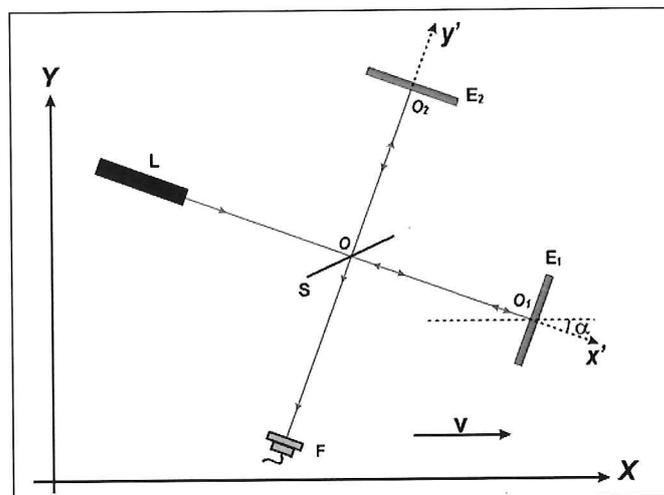


Figura 4. El interferómetro y el sistema de ejes fijo.

<sup>3</sup> Esto quiere decir que la velocidad de rotación de la Tierra respecto a su eje no se tiene en cuenta, ya que es unas cien veces menor que la de traslación alrededor del Sol.

<sup>4</sup> Esto equivale a decir que la velocidad del Sol respecto al éter se considera prácticamente nula.

Tomaremos, además, otro sistema de ejes móvil asociado a los brazos del interferómetro,  $\{X', Y'\}$ , que se desplaza con velocidad  $v$  sobre el plano  $\{X, Y\}$ . En general, el eje  $X'$  formará un ángulo  $\alpha$  con el eje  $X$ , que podremos hacer variar mediante el giro solidario de todo el interferómetro. Por consiguiente, lo que analizan Michelson y Morley es la proyección del movimiento de la Tierra respecto al éter sobre el plano horizontal en Cleveland.

En tercer lugar, admiten que el módulo de la velocidad  $v$  es del mismo orden de magnitud que el de la velocidad de la Tierra en su órbita solar<sup>4</sup>. Como la órbita terrestre tiene un radio de unos 150 millones de kilómetros y su periodo es de un año, el módulo de la velocidad vale, aproximadamente,  $3 \times 10^4$  m/s. Es decir, una diezmilésima parte de la velocidad de la luz  $c$  en el vacío. (Para su utilización posterior definiremos la siguiente relación entre estas velocidades:  $\beta = v/c = 10^{-4}$ .)

Y, en cuarto lugar, suponen que la velocidad de la luz en cada uno de los brazos del interferómetro respecto al sistema fijo  $\{X, Y\}$  se obtiene aplicando el principio de relatividad de Galileo. Esto quiere decir que la marcha de los rayos respecto al sistema móvil  $\{X', Y'\}$  es exactamente la descrita en la Figura 1: El rayo n° 1 que sale de  $O$  incide siempre sobre el centro del espejo  $E_1$  (punto  $O_1$ ) y vuelve sobre el punto  $O$ . Lo que sucede es que estos puntos han cambiado de ubicación en el espacio absoluto mientras la luz va y viene. Lo mismo pasa con el rayo n° 2.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, con ayuda de la Figura 4 se pueden establecer las siguientes expresiones para la velocidad de la luz en el espacio absoluto:

$$\text{Brazo n° 1, camino de ida } O \rightarrow O_1: \\ c = (c_1 \cos \alpha + v, -c_1 \sin \alpha)$$

$$\text{Brazo n° 1, camino de vuelta } O_1 \rightarrow O: \\ c = (-c'_1 \cos \alpha + v, c'_1 \sin \alpha)$$

$$\text{Brazo n° 2, camino de ida } O \rightarrow O_2: \\ c = (c_2 \sin \alpha + v, c_2 \cos \alpha)$$

$$\text{Brazo n° 2, camino de vuelta } O_2 \rightarrow O: \\ c = (-c'_2 \sin \alpha + v, -c'_2 \cos \alpha)$$

donde  $c_1, c'_1, c_2$  y  $c'_2$  son los módulos de la velocidad de la luz en los brazos del interferómetro con respecto al sistema móvil  $\{X', Y'\}$ , cuyas expresiones determinaremos posteriormente.

En el último trayecto de los dos rayos, el que va de la lámina separadora hacia el fotómetro, el movimiento de la Tierra respecto al éter les afecta por igual, por lo que la diferencia de caminos ópticos entre ambos sólo se produce en los trayectos de ida y vuelta de la lámina separadora a los dos espejos  $E_1$  y  $E_2$ .

Aunque Michelson y Morley solamente hicieron el cálculo del desfase para los casos en que  $v$  es paralela a uno de los brazos del interferómetro, merece la pena obtener la expresión general de  $\delta$  para cualquier dirección del movimiento de la Tierra con relación a los ejes fijos.

### Camino óptico $\Delta_1$ recorrido por la luz en el brazo n° 1

En el instante inicial, cuando la luz sale del punto  $O$  hacia el punto  $O_1$ , las coordenadas de éstos respecto al sistema  $(X, Y)$  son:

$$O \rightarrow (x_0, y_0) \\ O_1 \rightarrow (x_0 + d_1 \cos \alpha, y_0 - d_1 \sin \alpha)$$

Durante el intervalo de tiempo  $t_1$  el espejo  $E_1$  se ha trasladado a la velocidad  $v$ , de manera que el punto  $O_1$  ocupa la siguiente posición (siempre en el sistema fijo):

$$O_1(t_1) \rightarrow (x_0 + d_1 \cos \alpha + v t_1, y_0 - d_1 \sin \alpha)$$

En ese instante lo alcanza la luz, que ha viajado hasta allí con la velocidad  $c = (c_1 \cos \alpha + v, -c_1 \sin \alpha)$  indicada más arriba. Por lo tanto, las coordenadas del punto de encuentro también se podrán escribir de la siguiente manera:

$$O_1(t_1) \rightarrow (x_0 + c_1 t_1 \cos \alpha + v t_1, y_0 - c_1 t_1 \sin \alpha)$$

Identificando las coordenadas de  $O_1(t_1)$  se elimina  $t_1$ , y se obtiene la posición de la luz en el instante en que se produce la reflexión en  $E_1$ :

$$O_1(t_1) \rightarrow (x_0 + d_1 \cos \alpha + \beta_1 d_1, y_0 - d_1 \sin \alpha) \\ \text{donde } \beta_1 = v/c_1.$$

Por lo tanto, el camino óptico  $\Delta_{1,ida}$  recorrido por la luz hasta reflejarse en  $E_1$  es:

$$\Delta_{1,ida} = d_1 \sqrt{1 + \beta_1^2 + 2\beta_1 \cos \alpha}$$

De manera análoga se determina el camino óptico  $\Delta_{1,vuelta}$  recorrido en el camino de vuelta hasta alcanzar al punto  $O$  de la lámina separadora en su nueva posición:

$$\Delta_{1,vuelta} = d_1 \sqrt{1 + \beta_1'^2 - 2\beta_1' \cos \alpha}$$

con  $\beta_1' = v/c'_1$ .

En definitiva, el camino óptico  $\Delta_1$  recorrido por la luz en el brazo n° 1 del interferómetro resulta ser:

$$\Delta_1 = d_1 [A_1(\alpha) + A_1'(\alpha)]$$

donde:

$$A_1(\alpha) = \sqrt{1 + \beta_1^2 + 2\beta_1 \cos \alpha}$$

$$A_1'(\alpha) = \sqrt{1 + \beta_1'^2 - 2\beta_1' \cos \alpha}$$

### Camino óptico $\Delta_2$ en el brazo n° 2

De igual modo se obtiene el camino óptico  $\Delta_2$  recorrido por la luz en el brazo n° 2:

$$\Delta_2 = d_2 [A_2(\alpha) + A_2'(\alpha)]$$

donde:

$$A_2(\alpha) = \sqrt{1 + \beta_2^2 + 2\beta_2 \sin \alpha}$$

$$A'_2(\alpha) = \sqrt{1 + \beta_2'^2 - 2\beta_2' \sin \alpha}$$

### Cálculo de las relaciones $\beta_1$

El cálculo de estas relaciones está basado en el hecho de que el módulo de  $c$  es el mismo en toda dirección del espacio absoluto (éter luminífero isótropo y en reposo). Por ejemplo, para  $\beta_1$  tenemos:

$$c = (c_1 \cos \alpha + v, -c_1 \sin \alpha) \Rightarrow c_1^2 + 2v \cos \alpha c_1 + v^2 - c^2 = 0$$

Como  $c_1 > 0$ , la única solución posible es:

$$c_1 = \sqrt{c^2 - v^2 \sin^2 \alpha} - v \cos \alpha$$

resultando para  $\beta_1$ :

$$\beta_1 = \frac{v}{\sqrt{c^2 - v^2 \sin^2 \alpha} - v \cos \alpha}$$

que, en función de  $\beta = v/c$ , definida anteriormente, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\beta_1 = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \alpha} - \beta \cos \alpha}$$

Análogamente se calculan las otras  $\beta_i$

$$\beta_1' = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \alpha} + \beta \cos \alpha}$$

$$\beta_2 = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \alpha} - \beta \sin \alpha}$$

$$\beta_2' = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \alpha} + \beta \sin \alpha}$$

Finalmente, la diferencia  $\Delta$  de camino óptico entre los dos brazos del interferómetro es:

$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1$$

con lo que el desfase en su forma general en función del ángulo  $\alpha$  será:

$$\delta(\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ d_2 [A_2(\alpha) + A'_2(\alpha)] - d_1 [A_1(\alpha) + A'_1(\alpha)] \right\}$$

Particularizando para  $\alpha = 0$  y para  $\alpha = \pi/2$  se obtienen los desfases  $\delta_{||}$  y  $\delta_{\perp}$  y su diferencia nos proporciona el siguiente valor:

$$\delta_{\perp} - \delta_{||} = \frac{2\pi}{\lambda} 2 (d_2 + d_1) \left( \frac{1}{1 - \beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right)$$

Como  $\beta$  es muy pequeño frente a la unidad, se puede desarrollar la raíz cuadrada en serie de Taylor y se obtiene el resultado del cálculo de Michelson y Morley:

$$\delta_{\perp} - \delta_{||} \cong \frac{2\pi}{\lambda} (d_2 + d_1) \beta^2$$

### EL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE MICHELSON-MORLEY

En el primer experimento que realizó Michelson en 1881, las longitudes  $d_1$  y  $d_2$  eran de un metro, por lo que el desplazamiento esperado de las franjas tendría que ser del orden de  $2 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ , es decir, del orden de  $0,04 \lambda$ , mientras el error del tornillo micrométrico en la medida del desplazamiento de las franjas era de  $0,02 \lambda$ . El desplazamiento esperado se encontraba muy próximo al error del aparato. Era necesario, pues, hacer que el efecto fuera mucho mayor.

Por otra parte, tanto las vibraciones del suelo y de las paredes del laboratorio como las variaciones de temperatura podían enmascarar las interferencias. En su artículo, Michelson y Morley cuentan que cuando trabajaban en la ciudad no les era posible observar las franjas de interferencia más que en pequeños intervalos de tiempo, y eso, a las dos de la madrugada, cuando la ciudad dormía. Además, cuando trataban de hacer girar en bloque el dispositivo interferométrico, las distorsiones en las franjas eran muy grandes y había que esperar bastante tiempo a que se estabilizaran.

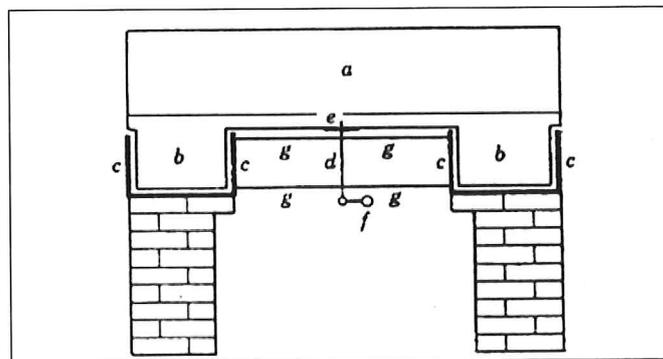


Figura 5. Vista en alzado del dispositivo experimental utilizado por Michelson y Morley.

Lo primero que hicieron fue resolver el problema de la influencia de las vibraciones y del giro del aparato. En la Figura 5 se muestra un esquema del alzado del dispositivo y en la Figura 6 un dibujo en perspectiva del mismo, tal y como aparecen en su trabajo.

Veamos primero el esquema del alzado. La parte  $a$  es un bloque de piedra cuadrado, de 1,5 m de lado y de 0,3 m de espesor. Descansa sobre un anillo de madera  $bb$ , de 1,5 m de diámetro exterior, 0,7 m de diámetro interior y 0,25 m de espesor. El anillo de madera flota sobre un lecho de mercurio contenido en una cubeta de hierro,  $cc$ , de paredes de 1,5 cm de espesor y de dimensiones tales que puede contener el anillo de madera, dejando una separación lateral entre hierro y madera de 1 cm. El eje  $d$  encaja en un

manguito  $e$  (solidario con el flotador), y puede ser accionado con una palanca para producir el giro del sistema. La cuba de hierro descansa sobre un pedestal de ladrillo de poca altura. Esta disposición evita tanto las vibraciones del suelo como la distorsión de las franjas durante el giro del dispositivo, que debe hacerse lo más lentamente posible (unos seis minutos por vuelta) y de manera continua, sin brusquedades.

Veamos ahora la Figura 6. La piedra sobre la que se disponen los elementos ópticos podía girar y, con objeto de determinar el ángulo girado, en la cuba de hierro se trazaron 16 marcas equidistantes.

Sobre las cuatro esquinas del bloque de piedra se ins-

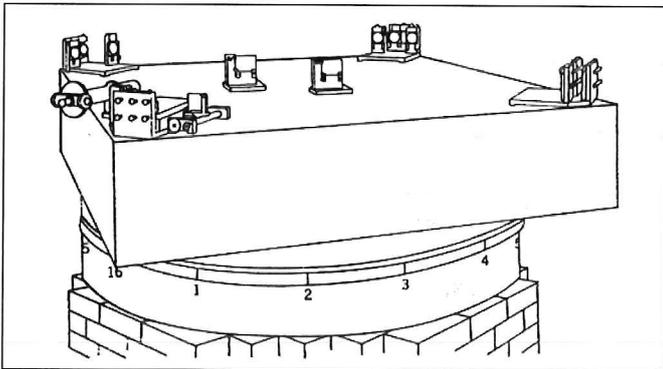


Figura 6. Vista en perspectiva del dispositivo experimental utilizado por Michelson y Morley.

talaban sendos grupos de cuatro espejos cada uno, con dispositivos micrométricos de ajuste de dirección. En la parte central se colocaron la lámina separadora  $S$  y una lámina compensadora de camino óptico para el brazo nº 1, del mismo espesor y material que la lámina separadora pero sin metalizar (completamente transparente). El anteojo y el tornillo micrométrico de ajuste del brazo nº 2 se encuentran en la esquina inferior izquierda del bloque de piedra.

El objetivo perseguido con los cuatro grupos de espejos colocados en las esquinas es el de hacer que aumenten las distancias  $d_1$  y  $d_2$  de los brazos del interferómetro. La Figura 7, tomada del artículo de Michelson-Morley, muestra la marcha de los rayos. La luz que proviene de la lente colimadora ( $a$  en el dibujo) incide en la lámina separadora ( $b$  en el dibujo) y desde allí recorre dos caminos diferentes. En el brazo que hemos denominado nº 1 camina hasta llegar al espejo  $d$ , allí se refleja con un determinado ángulo y, después de varias reflexiones en diagonal, llega al espejo  $e$ , opuesto al  $d$ , incidiendo sobre él perpendicularmente. Recorre ahora el camino inverso hasta volver sobre  $d$ , reflejarse en él y alcanzar la lámina separadora  $b$  completando su recorrido. De esta manera, el brazo  $d_1$  ha sido alargado hasta unos 11 m. Lo mismo se hace con el brazo  $d_2$ , por lo que el efecto a observar debe aumentar en un orden de magnitud con relación al primer experimento intentado por Michelson. Es decir, si en aquella ocasión se esperaba un desplazamiento de las franjas de  $0,04 \lambda$ , ahora podía esperarse un desplazamiento de  $0,4 \lambda$  que ya es mucho mayor que el error del aparato (unas veinte veces).

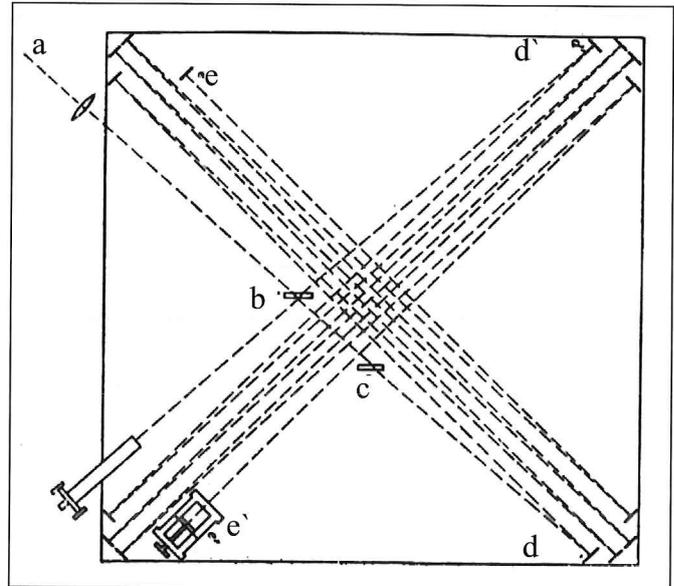


Figura 7. Marcha de los rayos en el experimento de Michelson-Morley.

## RESULTADOS DE MICHELSON-MORLEY

Después de varias pruebas para entrenarse en hacer girar el aparato de manera lenta y continua, ajustando el tornillo micrométrico al paso por cada una de las 16 marcas de la cuba de hierro sin detenerse en ellas, realizaron el experimento definitivo los días 8, 9 y 11 de julio de 1887. Hicieron una medida por la mañana, hacia las doce horas, y otra por la tarde, hacia las seis, lo que equivale a realizar el experimento para dos orientaciones distintas del plano horizontal del lugar.

En la Tabla 1 se indica un resumen de los resultados de la tarde. En la primera columna aparece el número de la marca de la cuba de hierro (ver dibujo de la Figura 6); en la columna segunda aparece la división de la cabeza del tornillo micrométrico a la que estaba ajustado el centro de la franja observada para dicha marca; y en la tercera columna se indica el desplazamiento observado, medido en fracciones de longitud de onda (cada división de la segunda columna corresponde a  $0,02 \lambda$ ).

Tabla 1. Resultados de Michelson y Morley

Nº de marca	División	Fracción de $\lambda$
16	51,3	0
1	51,9	0,01
2	52,5	0,02
3	53,9	0,05
4	53,8	0,05
5	54,1	0,06
6	54,3	0,06
7	53,7	0,05
8	53,4	0,04

( $\lambda = 589,3$  nm, doblete amarillo del sodio utilizado en el experimento)

Como puede verse, el desplazamiento que se observa en un giro de  $180^\circ$  es unas diez veces menor que el esperado

teóricamente ( $0, 4 \lambda$ ) y está muy próximo a los errores experimentales. Con objeto de visualizar mediante gráficas la comparación teoría-experimento, hemos supuesto que la marca nº 16 corresponde a la situación en que el eje  $X'$  es paralelo a  $\nu$  ( $\alpha = 0$ ), como parece deducirse del artículo de Michelson y Morley. En la Figura 8 se comparan los desplazamientos esperados y observados de las franjas, y en la Figura 9, las intensidades que, en el caso de haber dispuesto de fotómetro, hubieran podido determinar y comparar Michelson y Morley.

## CONSECUENCIAS

La consecuencia fundamental que se obtiene de este experimento es que Michelson y Morley no pudieron detectar movimiento alguno de la Tierra respecto del éter. Como no habían tenido en cuenta el movimiento del Sol (del cual poco sabían en la época), en su artículo todavía hablaban de la posibilidad de que en el momento de hacer su experimento (julio de 1887) el movimiento de la Tierra estuviera enmascarado por él. Aunque ellos no tenían mucha fe en esta conjetura, se propusieron repetir el experimento cada tres meses para, al situarse la Tierra en distintos puntos de su órbita en torno al Sol, eliminar la incertidumbre que dicha presunción creaba. No llegaron a repetir el experimento, pero su resultado negativo se tuvo por bueno y fue analizado en profundidad por muchos autores.

Los comentarios que se hicieron sobre él, intentando explicar la razón por la cual no se podía comprobar experimentalmente la existencia de un éter fijo, con un sistema de referencia absoluto, como se deducía de los principios de la Mecánica Newtoniana, condujeron a Einstein, algunos años más tarde (en 1905), a revisar en profundidad los conceptos de distancia e intervalo de tiempo, rechazando la existencia de un espacio y un tiempo absolutos y proponiendo sus dos célebres postulados de relatividad:

- *La velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los sistemas de referencia en movimiento uniforme relativo.*
- *Las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los sistemas de referencia en movimiento uniforme relativo.*

Así pues, de un fracaso experimental surgió una nueva teoría, la Teoría de la Relatividad Restringida, que revolucionó las ideas en el campo de la Física. Según el propio Einstein:

*“¡La influencia de la teoría de la relatividad va mucho más allá del problema del cual se originó! Ella soluciona las dificultades y contradicciones de la teoría del campo; formula leyes más generales de la mecánica; reemplaza dos principios de conservación por uno solo y modifica nuestro concepto clásico del tiempo absoluto. Su validez no se limita a un dominio de la Física sino que constituye un armazón general que abarca todos los fenómenos de la naturaleza!”.*

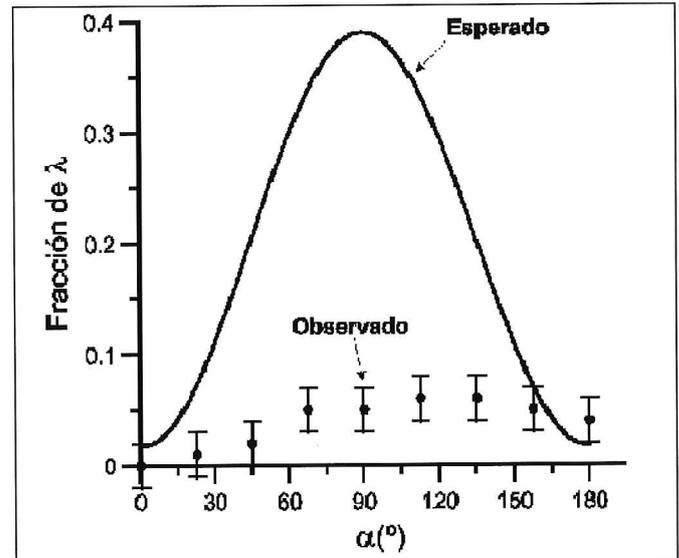


Figura 8. Comparación entre el desplazamiento de franjas esperado y observado.

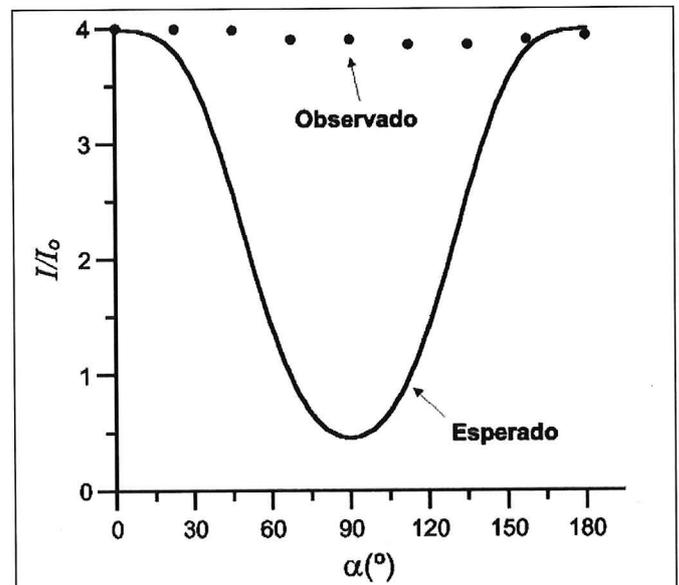


Figura 9. Comparación entre intensidades teóricas y experimentales.

## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

Para más detalles consúltense los siguientes libros:

- *La teoría de la relatividad: Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*, Albert Einstein, Adolf Grünbaum, A.S. Eddington y otros, Selección e introducción de L. Pearce Williams, Alianza Universidad, Madrid (1973). En este libro se encuentra el artículo de Michelson y Morley.
- *Óptica*, E. Hecht, Addison Wesley Iberoamericana, Madrid (2000).
- *La Física, una aventura del pensamiento*, A. Einstein, Ed. Losada, Buenos Aires (1939).

Manuel Yuste Llandres  
Carmen Carreras Béjar  
Dpto. de Física de los Materiales