

Análisis básico del experimento de Michelson y Morley (1887).

Enrique Ordaz Romay - eorgazro@cofis.es ¹

Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid (España)

Resumen:

Aun cuando hace ya 120 años del experimento de Michelson y Morley, muchos estudiantes e incluso profesionales no alcanzan a comprender las razones básicas por las cuales este experimento cambió la forma de entender la física. En muchas ocasiones nos plantean la pregunta: -¿Cómo se deduce del experimento de Michelson y Morley que la velocidad de la luz es constante?-.

Para entender la relación entre el experimento de Michelson y Morley y constancia de la velocidad de la luz en el vacío hay que volver a revivir los acontecimientos que mediaron entre 1887 y 1905. En esos 18 años, fundamentalmente Lorentz, Larmor, Poincaré y Einstein trabajaron individualmente para obtener una teoría coherente con la teoría electrodinámica de Maxwell y el experimento de Michelson y Morley que finalmente desembocaría en la relatividad especial.

En este artículo se hace un repaso conceptual de estos desarrollos, orientado a que, cualquier estudiante con un nivel físico y matemático preuniversitario, pueda entender estas ideas que cambiaron los cimientos de la física en los albores del siglo XX.

Introducción:

Desde 1865, con la teoría del electromagnetismo de Maxwell, estaba definitivamente zanjado el problema de la naturaleza de la luz. Según esta teoría, la luz era una onda. Como todas las ondas deben viajar en un medio, y la luz es capaz de viajar por el espacio, en el espacio debía existir el medio en el cual viajaba la luz. A este medio se le llamó ÉTER.

Las ondas se caracterizan porque su velocidad depende sólo del medio y no de la velocidad del foco emisor o del receptor. Así, por ejemplo, una onda sonora viajará respecto del medio (por ejemplo, aire) siempre a la misma velocidad (240 m/s), independientemente de las velocidades a las que se muevan emisor y receptor. Las velocidades del emisor y receptor cambiarán la frecuencia de las ondas produciendo efectos Doppler, pero no cambiarán la velocidad de la onda respecto del medio.

Sin embargo, si el medio se mueve (por ejemplo, si para el sonido es el aire, nos referimos al viento), entonces, respecto de un receptor en reposo, la velocidad total de la onda será la suma vectorial de la velocidad de la onda respecto de medio y la velocidad del medio respecto del receptor.

En el caso de la onda de luz y el éter, como medio en el cual se desplaza, la Tierra, en su traslación alrededor del Sol y este a su vez, viajando a través de la galaxia, hacen que la Tierra viaje a una velocidad v por el espacio (ya casi 30 Km/s solo por su velocidad de traslación en la órbita). En estas condiciones, Puesto que el éter debe llenar el espacio “vacío”, la Tierra debe mostrar algún movimiento perceptible respecto del éter, en alguna dirección.

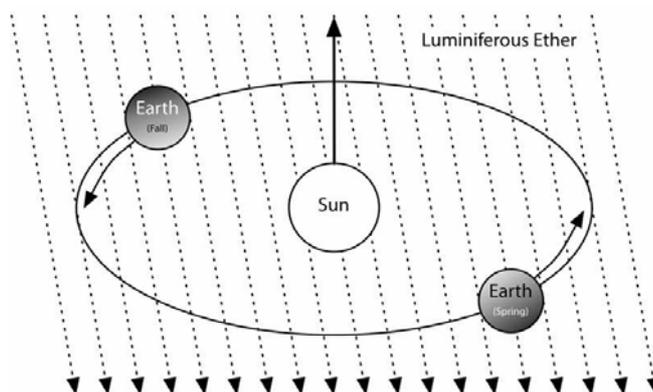


Imagen tomada de wikimedia con la licencia documentación libre GNU
http://es.wikipedia.org/wiki/Licencia_de_documentaci%C3%B3n_libre_GNU

En el experimento de Michelson y Morley se intentaba medir cual era la velocidad de luz en la Tierra, en distintas direcciones, a distintas horas y en distintos momentos del año,

¹ eorgazro@cofis.es

suponiendo que el movimiento relativo del éter no puede ser igual, a la vez, en dos direcciones distintas.

Una forma de entender el experimento es imaginarlo parecido al de medir la velocidad de una onda de sonido cuando hay viento. Es decir, lo que se pretendía con este experimento era calcular la velocidad del “viento” de éter luminífero.

Método:

La razón teórica clásica de este experimento se basa en que la luz viaja a una velocidad c respecto de su fuente y en un medio en reposo. Como la Tierra se mueve a una velocidad v , la velocidad relativa de la Tierra, en las distintas direcciones, respecto del éter (medio en el que se mueve la luz), varía a lo largo del día y de los meses. En consecuencia, la velocidad de la luz medida en la Tierra en condiciones óptimas (es decir, cuando la tierra se mueve en la misma dirección del éter), debería ser:

- $c - v$ en la dirección y sentido del movimiento de la Tierra.
- $c + v$ en la dirección y sentido contrario del movimiento de la Tierra.
- $\sqrt{c^2 - v^2}$ en la dirección perpendicular al movimiento de la Tierra.

El método práctico consistía en utilizar lo que se conoce como interferómetro de Michelson: un aparato utilizado para medir las distancias con precisión. En un sistema en el que el éter estuviera en reposo respecto del observador y la fuente, el interferómetro funcionaría de la siguiente forma (figura 1):

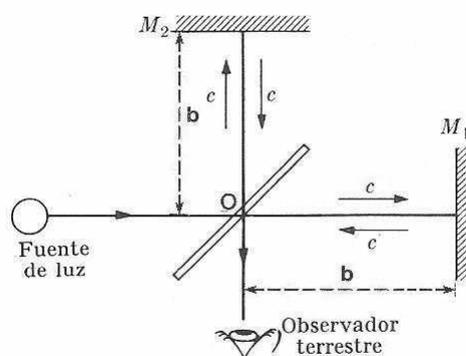


Figura 1. Interferómetro de Michelson en un sistema en reposo

Si el éter se moviera (como si midiéramos la velocidad de las ondas sonoras en aire en movimiento), las trayectorias de los rayos serían (visto desde el sistema en reposo; figura 2):

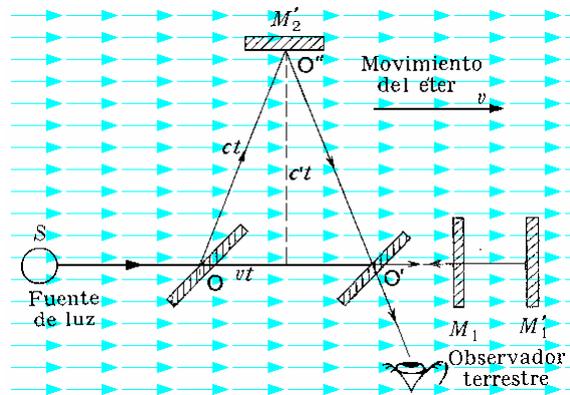


Figura 2. Intereferómetro de Michelson en un sistema con éter en movimiento

En estas condiciones la velocidad de la luz c' resultante, que se mediría en la Tierra en el eje perpendicular al movimiento, sería: $c' = \sqrt{c^2 - v^2}$ (aplicando Pitágoras). Visto desde el observador las trayectorias y velocidades serán (figura 3):

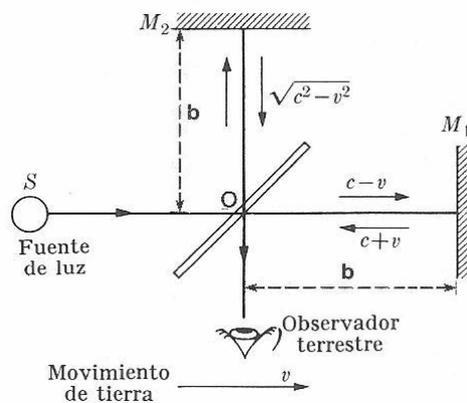


Figura 3. Intereferómetro de Michelson en un sistema con éter en movimiento visto desde el observador.

En el interferómetro lo que se mide es la proporción entre c y c' cuyo valor es: $\frac{c'}{c} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Resultado del experimento:

Los resultados del experimento, tal como se consignaron en la publicación A. A. Michelson and E.W. Morley, Philos. Mag. S.5, 24 (151), 449-463 (1887), fueron negativos.

Esto es, independientemente de la dirección la medida, la hora el día y el mes, la velocidad de la luz es la misma y constante. Es decir, independientemente de la dirección, hora y día, los resultados son que $c'/c = 1$, como si el sistema estuviera en reposo respecto del éter (tal como en la figura 1).

Conclusiones:

Las conclusiones de este experimento fueron básicamente cuatro:

- El éter no debía existir.
- En 1902 Lorentz supuso que en la dirección del movimiento, el brazo del interferómetro sufría una contracción precisamente en un factor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.
- En 1904 Lorentz enmarca la contracción (que ya se empezaba a conocer como contracción de Lorentz) en el conjunto de un cambio a las transformaciones de Galileo. A estas transformaciones de Galileo modificadas se les llamó Transformaciones de Lorentz.
- En 1905 Einstein propone que las transformaciones de Galileo son una consecuencia de un principio más general: La constancia de la velocidad de la luz en los sistemas inerciales.

El éter no debía existir.

El experimento indicaba que, si existía, el éter debía estar en reposo en todas las direcciones y en cualquier sistema inercial. Puesto que la tierra se mueve, que el éter estuviera en reposo debería ser imposible. En consecuencia el éter no debía existir.

La ausencia del éter abría un nuevo problema: Si el éter no existe: o la luz no era una onda, en contra de los fenómenos de interferencias (Young 1801) y difracción (Fresnel 1818) y de la teoría electromagnética de Maxwell, o en caso de ser onda ¿cual era el medio en el que se movía la luz?

La propuesta de Lorentz de 1902

La idea de Lorentz de 1902 era ingeniosa: la ecuación $\frac{c'}{c} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ se basa en que, en reposo los dos brazos del interferómetro miden lo mismo (se calibran cambiando las orientaciones). Pero ¿necesariamente esto quiere decir que, en movimiento, deben medir lo mismo?. Si suponemos que en movimiento el brazo horizontal del interferómetro pasa de ser b a ser b' entonces, para que se cumplan todas las ecuaciones teóricas y resultados prácticos debe verificarse que:

$$b' = \frac{b}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Con este resultado como $c = b'/t$ y $c' = b/t$ (Lorentz en 1902 consideraba el tiempo absoluto) todas las ecuaciones cuadraban. A esta contracción se le llamó *contracción de Lorentz-Fitzgerald* (publicada en 1903).

Ahora bien, ¿por qué se producía esta contracción? Lorentz lo enfocó de una forma muy inteligente. Supongamos por un momento que sí existe el éter. Lorentz entonces se preguntaba ¿Cómo afectaría este éter al campo electromagnético?.

Está claro que a la luz, que es una onda electromagnética, el éter le afectaba cambiando su velocidad precisamente en un factor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ al que se llamó factor de Lorentz. Siendo así, como los enlaces moleculares de los cuerpos macroscópicos son también por fuerzas electromagnéticas, entonces el éter también debía modificar las distancias intermoleculares.

En consecuencia, de una forma muy ingeniosa Lorentz pretendía salvar el concepto de éter a costa de una contracción en la dirección del movimiento.

¿Cómo pretendía llevar a cabo esta contracción sobre los campos electromagnéticos?. En un primer momento Lorentz hizo un estudio exhaustivo de las propiedades moleculares de los sólidos y como estas debían variar con la velocidad del éter. Es decir, se planteó el problema desde un punto de vista químico. Pero sus resultados, no solo no fueron concluyentes, sino que en el mejor de los casos eran ambiguos.

La propuesta de Lorentz de 1904

En 1904 Lorentz se planteó el problema, nuevamente, desde un punto de vista físico. Ya no estaba tan convencido de la existencia del éter y empezó a pensar que el error estaba en las transformaciones de Galileo modificadas por él mismo en 1897.

En 1638 Galileo estableció cuales deberían ser las transformaciones para pasar las coordenadas de un sistema de referencia a otro que se moviera respecto del primero con una velocidad constante v en el eje de las x . Estas ecuaciones eran:

$$\begin{aligned}x &= x' + vt' \\ y &= y' \\ z &= z'\end{aligned}$$

En esa época el tiempo se consideraba absoluto y que no dependía del sistema de referencia. Por ello, aunque actualmente se completan estas tres ecuaciones con $t = t'$, lo cierto es que Galileo no escribió nunca esta cuarta ecuación por ser para él una obviedad.

En 1865 Maxwell desarrolló un conjunto de cuatro ecuaciones que resumían todos los trabajos anteriores que se habían hecho en electricidad y magnetismo: Ley de Gauss, ausencia de monopolos magnéticos (del propio Maxwell), Ley de Faraday y ley de Ampere (generalizada por Maxwell). Estas ecuaciones combinadas, conducían a la expresión de las ondas electromagnéticas, pero no eran invariantes ante las transformaciones de Galileo, esto es, si en tales ecuaciones se sustituyen x , y y z por x' , y' y z' según las transformaciones de Galileo, el resultado son ecuaciones distintas.

En 1897 Lorentz observó que las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo se podrían ajustar a unas transformaciones de Galileo “modificadas” asumiendo que el tiempo era variable en ambos sistemas, de forma tal que las transformaciones quedaban de la forma:

$$\begin{aligned}x &= x' + vt' \\y &= y' \\z &= z' \\t &= t' + \frac{v}{c^2} x'\end{aligned}$$

A este concepto de transformación del tiempo se le llamó “tiempo local de Lorentz” que analizado por Poincaré en 1900 correspondía a la sincronización de relojes mediante señales luminosas, suponiendo que la luz fueran partículas. La cuestión era la siguiente (recordemos que aun estamos en mecánica prerrelativista): Si un reloj mide un tiempo t , un observador que se encuentre en reposo respecto del reloj, pero a una distancia x' verá el reloj retrasado en x'/c (que es el tiempo que tarda la señal luminosa en llegar hasta el observador).

Sin embargo, si el observador se mueve alejándose del reloj a una velocidad v , el retraso será debido, no sólo a la distancia, sino también a la “disminución” (¡recordemos que aun estamos en mecánica prerrelativista!) de la velocidad de la luz por efecto de la velocidad v (suponiendo que la luz fueran partículas). Es decir, si en el sistema en reposo la velocidad de la luz es c , en el sistema en movimiento debería viajar a una velocidad (¡¡recordemos que aun estamos en mecánica prerrelativista!!) de $c + v$.

Puesto de la distancia recorrida por la luz debía ser la misma: $x = x'$, (estamos en 1900) esta diferencia de velocidad será a costa de una diferencia entre t y t' ($c = x/t$; $c + v = x'/t'$) de la forma $t \cdot c = t' \cdot (c + v)$. Desarrollando (Poincaré 1900; recordemos que este desarrollo no tiene en cuenta la contracción de Lorentz):

$$\begin{aligned}t \cdot c = t' \cdot (c + v) &\rightarrow t = t' \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \rightarrow t \left(1 - \frac{v}{c}\right) = t' \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \left(1 - \frac{v}{c}\right) \rightarrow t - \frac{v}{c} t = t' \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \rightarrow \\t - \frac{v}{c^2} x &= t' - \frac{v^2}{c^2} t' \rightarrow t = t' - \frac{v^2}{c^2} t' + \frac{v}{c^2} x \rightarrow t = t' + \frac{v}{c^2} (x - vt') \rightarrow t = t' + \frac{v}{c^2} x'\end{aligned}$$

que era la modificación que hizo Lorentz a las transformaciones de Galileo en 1897.

En 1904 Lorentz se dio cuenta que debía hacer unas nuevas modificaciones a las transformaciones de Galileo modificadas en 1897, para añadirles el factor de Lorentz. En un principio, para que se verificara la contracción de Lorentz era necesario que el factor se incluyera en la transformación de la coordenada x :

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sin embargo, esto implica que en el desarrollo de Poincaré hay que partir, en vez de $x = x'$ de una expresión con el factor de Lorentz acorde con la contracción, obteniendo:

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esta transformación del tiempo estaba de acuerdo con las observaciones hechas por Larmor en 1897 que indicaban que el movimiento circular de un electrón en un campo magnético exterior, según las ecuaciones de Maxwell, suponía una dilatación del tiempo propio del electrón en un factor igual al factor de Lorentz. En consecuencia las transformaciones de Lorentz en 1904 quedaban establecidas de la siguiente forma:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Y su interpretación era la siguiente: “cuando se hace un cambio de sistema de referencia entre dos sistemas inerciales que se separan a una velocidad v , si la posición y tiempo de un suceso se realiza mediante señales luminosas, las transformaciones de Lorentz nos indican las coordenadas en el nuevo sistema”.

Como podemos comprobar, aunque las transformaciones son relativistas, la interpretación es claramente prerrelativista.

La propuesta de Einstein de 1905.

Como habremos observado, la deducción de las transformaciones de Lorentz fue básicamente fenomenológica. Esto es, mediante unas observaciones se modificaron las transformaciones de Galileo.

Para Einstein, la forma de afrontar el problema es desde el resultado básico y esencial del experimento de Michelson y Morley. Esto es, como $c/c' = 1$ entonces $c = c'$. En consecuencia, no sólo no existe el éter, si no que, además, la velocidad de la luz debe ser constante e independiente del sistema de referencia inercial en el cual se mida.

La cuestión es básicamente la siguiente: Una onda tiene una determinada velocidad respecto del medio en el cual se transmite. Las diferencias en las velocidades medidas dependen de la velocidad del medio respecto del foco y del observador. Si no existe el éter pero la luz sigue siendo una onda, su velocidad es independiente de las velocidades del foco y del observador.

Dicho de otra forma: el medio en el cual se transmite una onda es el “intermediario” que permite relacionar la velocidad de la onda en el medio con la velocidad de foco y observador en el medio. En el caso de la luz, si no hay medio, la velocidad de la luz es independiente de la velocidad del foco y el receptor.

Cabría preguntarse: Si no existe el éter ¿En que medio se transmite la onda que es la luz?. La respuesta a esta pregunta la planteó Einstein mismo en su artículo anterior sobre el efecto fotoeléctrico, en el cual establece el cuanto de luz con la ecuación de Planck como el

corpúsculo lumínico (que más adelante se llamaría fotón). En consecuencia, la luz sería una dualidad onda-corpúsculo.

La constancia de la velocidad de la luz se puede expresar de la forma: Si (x, y, z) son las coordenadas de un punto que la luz tarda un tiempo t en alcanzar desde el origen, entonces:

$$c^2 \cdot t^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Esta es la ecuación de una esfera de centro el origen y de radio $c \cdot t$.

La constancia de la velocidad de la luz viene a decir que, en otro sistema de coordenadas, el mismo haz de luz que produce una esfera en el primero también debe producir una esfera en el segundo, es decir:

$$c^2 \cdot t'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2.$$

Por tanto, las transformaciones entre sistemas de referencia son aquellas que transforman unas “esferas de haces de luz” en otras “esferas de haces de luz”.

Busquemos estas transformaciones. Trabajemos en dos dimensiones, con transformaciones lineales. Entonces.

$$\begin{aligned} x &= a \cdot x' + b \cdot t' \rightarrow x^2 = a^2 x'^2 + b^2 t'^2 + 2abx't' \\ t &= g \cdot x' + d \cdot t' \rightarrow t^2 = g^2 x'^2 + d^2 t'^2 + 2gdx't' \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación de la primera esfera queda:

$$c^2 \cdot t^2 = x^2 \rightarrow c^2 \cdot (g^2 x'^2 + d^2 t'^2 + 2gdx't') = a^2 x'^2 + b^2 t'^2 + 2abx't'$$

Como este resultado se tiene que obtener la ecuación de la segunda esfera. De esta forma, los parámetros a , b , g y d nos quedan:

$$\begin{cases} ab - c^2 \cdot gd = 0 \\ c^2 \cdot d^2 - b^2 = 1 \\ a^2 - c^2 \cdot g^2 = 1 \end{cases}$$

Como cuarta relación establecemos que el segundo sistema de referencia se mueve respecto del primero con una velocidad $x'/t' = -v$. Esto conduce a la relación:

$$\text{Como } x = a \cdot x' + b \cdot t' \text{ para } x = 0 \text{ se obtiene } a \cdot x' = -b \cdot t' \rightarrow a \cdot v = b$$

Resolviendo el sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas se obtiene:

$$a = d = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad b = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad g = \frac{\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

que sustituido en el sistema lineal conduce a las transformaciones de Lorentz.

Como podemos ver, la hipótesis de la constancia de la velocidad de la luz en los sistemas inerciales explica los resultados del experimento de Michelson y Morley, la no existencia del éter y engloba desde un punto de vista teórico (y no fenomenológico) los resultados parciales de Larmor y Lorentz.

Bibliografía:

Alonso M, Finn EJ. (1970) *Física Vol I. Mecánica*. pp136-149 Addison-Wesley.

Experimento Michelson-Morley. Wikimedia.

http://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Michelson-Morley

Interferómetro de Michelson. Wikimedia.

http://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro_de_Michelson

Lorentz transformation. Wikimedia.

http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_transformation

Bibliografía Histórica:

Einstein A. (1905) *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik, 17:132-148

Einstein A. (1905) *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik. 17:891-921.

Larmor, J. (1897) "On a dynamical theory of the electric and luminiferous medium", Phil. Trans. Roy. Soc. 190, 205-300.

Lorentz, H. A. (1895) *Versuch Einer Theorie der Elektrischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*, Leiden (book).

Lorentz, H. A. (1899) "Simplified theory of electrical and optical phenomena in moving systems", Proc. Acad. Science Amsterdam, I, 427-43.

Lorentz, H. A. (1904) "Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light", Proc. Acad. Science Amsterdam, IV, 669-78.

Maxwell JC. *A Dynamical Theory Of The Electromagnetic Field*. London (1865):
[http://books.google.com/books?vid=ISBN0486495604&id=duyKrTNps_AC&pg=PA526&lp_g=PA526&dq="A+Dynamical+Theory+of+the+Electromagnetic+Field"&sig=twd-S431TklLmLLYbdZMKfl7H0g](http://books.google.com/books?vid=ISBN0486495604&id=duyKrTNps_AC&pg=PA526&lp_g=PA526&dq=)

Michelson AA, Morley EW, Phil. Mag. S.5, 24 (151), 449-463 (1887):
<http://www.aip.org/history/gap/PDF/michelson.pdf>

Poincaré, H. (1898) *La mesure du Temps*, reprinted in *La valeur de la science*, Ernest Flammarion, Paris.

Poincaré, H. (1900) *La Theorie de Lorentz et la Principe de Reaction*, Archives Neerlandaises, V, 252-78.