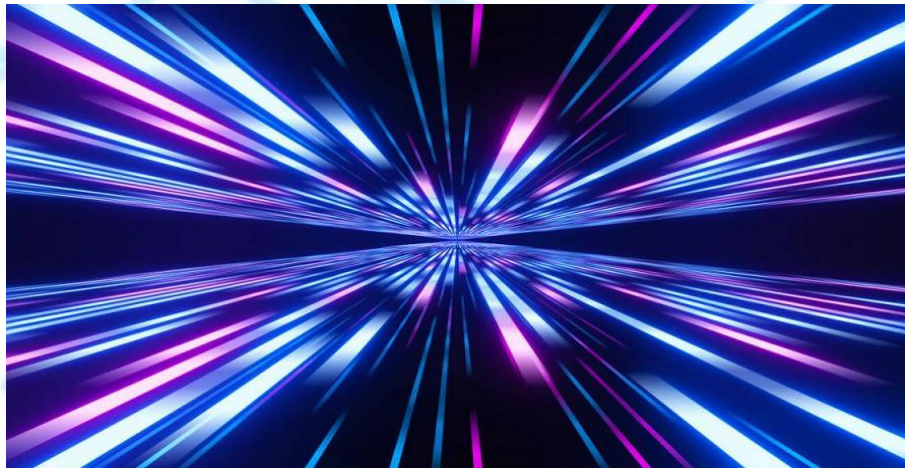


# VELOCIDAD DE LA LUZ



Erick Barrios Barocio.  
Óptica v.2025

Una de las preguntas más importantes y recurrentes a lo largo de la historia de la física ha sido ¿cuál es la velocidad a la que viaja la luz? Aunque actualmente su respuesta es considerada conocimiento general, y una definición básica, la historia de esta interrogante generó grandes avances en la óptica y en la ciencia, fomentando el desarrollo teórico y tecnológico. Uno de los métodos experimentales más comunes y relativamente sencillos para llevar a cabo esta medición es medir el tiempo de vuelo de un pulso de luz.

## Contenido

1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
2	HISTORIA DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ.....	1
3	COMO MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL VACÍO.....	3
4	REFERENCIAS.....	5

## 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A pesar de que la pregunta ¿a qué velocidad se propaga la luz? es muy antigua (desde los antiguos griegos), desde el punto de vista teórico, solo pudo ser respondida y fundamentada entre los años 1864 y 1873 por el físico James Clerk Maxwell en sus estudios sobre el electromagnetismo.

A través de sus estudios, Maxwell concluyo que, en el caso particular en el que el medio es el vacío donde se tiene que  $\{\rho = 0; \vec{j} = 0; \mu = \mu_0; \varepsilon = \varepsilon_0\}$ , se encuentra que los campos eléctrico y magnético cumplen la ecuación <sup>[1]</sup>:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1)$$

Y:

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2)$$

Las cuales tienen la forma de la ecuación de onda tridimensional:

$$\nabla^2 f(x, y, z, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

Donde  $v$  es la velocidad de propagación la onda. De esta forma se puede inferir que la velocidad de la onda electromagnética (EM) es:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (3)$$

Como  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$  y  $\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ , se encuentra que la velocidad de una onda EM es:

$$v = c = 2.9979 \times 10^8 \frac{m}{s} \quad (4)$$

## 2 HISTORIA DE LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Encontrar la velocidad de la luz ha motivado la realización de muchos experimentos a lo largo de la historia; sin embargo, debido a las limitantes tecnológicas, en la antigüedad fue imposible realizar experimentos con resultados coherentes, llevando a la conclusión de que la velocidad era infinita.

Durante el siglo XVII Galileo Galilei propuso un método el cual, se basaba en un razonamiento que ya había utilizado para medir la velocidad del sonido <sup>[2]</sup>. Su idea, era simplemente medir el retraso de tiempo en que un pulso de luz tardaba

en viajar una cierta distancia. La implementación de esta idea por parte de Galileo fue el primer intento experimental, del cual se tiene registro detallado, para medir la velocidad de la luz.

Lo que Galileo hizo fue pedirle a uno de sus ayudantes que subiera a la cima de una colina con una linterna, mientras que él subía a otra, también con una linterna. Durante la noche ambos cubrirían sus linternas con una manta. En un momento dado, Galileo descubriría su linterna para dejar que la luz saliera hacia su ayudante, y cuando éste observara la luz de Galileo, descubriría su linterna para que su luz viajara hacia Galileo (Figura 1). Galileo razonó que, si la luz tenía una velocidad finita, tardaría un cierto tiempo en llegar a su ayudante y de regreso, y habría una cierta diferencia de tiempo entre el momento en que él destapaba su linterna y el momento en que veía que su ayudante la destapaba. Así, tomando en cuenta el tiempo de reacción de su ayudante, sería posible encontrar el tiempo de retraso ( $t$ ) y, conociendo la distancia recorrida por la luz ( $D$ ), la velocidad podría ser calculada simplemente mediante la ecuación:

$$v = \frac{D}{t} \quad (5)$$

Donde hay que notar que  $D$  es dos veces la distancia entre las colinas ( $d$ ) ya que la luz recorre dos veces dicha distancia (va y regresa). A este método se le conoce comúnmente como medición del “Tiempo de Vuelo de la Luz” (TVL).

Sin embargo, el resultado de Galileo fue inconcluso, ya que en todos los intentos siempre obtenía como tiempo de retraso, el tiempo de reacción de su ayudante, lo que lo llevó a concluir que la velocidad era extremadamente grande (y no podía ser medida con la tecnología de dicha época).

Posteriormente, se concluyó que eran necesarias distancia mucho más grandes o mejores relojes. En 1675, el astrónomo Ole Roemer ideó un experimento, el cual se basaba en la combinación del método TVL y las leyes de Kepler. En este caso, la distancia involucrada era la distancia Tierra-Júpiter y el “reloj” de medición de tiempo eran los eclipses de Io (luna de Júpiter). Roemer encontró que dependiendo de la distancia Tierra-Júpiter a lo largo de un año, el periodo entre un eclipse y otro cambiaba debido a la diferencia de distancia [2, 3, 4]. Utilizando la distancia promedio Tierra-Júpiter dada por las leyes de Kepler y la diferencia de tiempo entre un eclipse en conjunción (la Tierra lo más lejos de Júpiter) y uno en oposición (la Tierra lo más cerca de Júpiter), Roemer fue la primera persona en dar un valor aproximado de la velocidad de la luz:  $2.2 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Conforme paso el tiempo y se inventaron nuevos instrumentos, fue posible realizar variaciones del método TVL más precisas. En 1849, el físico y astrónomo Hippolyte Fizeau, propuso un nuevo sistema que consistía en medir el tiempo que tardaba la luz en viajar desde una fuente de luz especial, hasta un espejo distante (a 8km) y regresar. La fuente de luz consistía de una rueda dentada rotatoria, la cual convierte un haz de luz de un foco en una serie de pulsos luminosos (Figura 2). El foco se colocaba junto a la rueda dentada cuya luz era redirigida con ayuda de un divisor de haz (placa semi-transparente). El divisor de haz permitía al observador recibir el pulso de luz a su regreso desde el espejo.

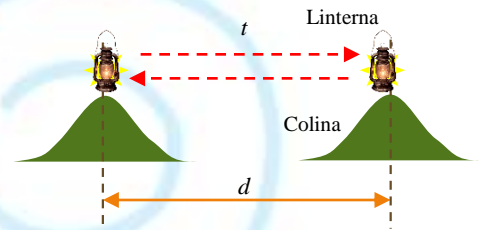


Figura 1. Arreglo experimental de Galileo para medir la velocidad de la luz.

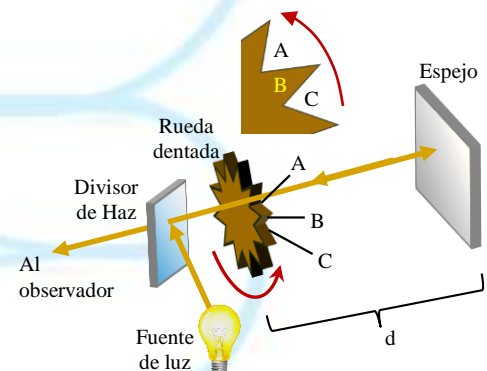


Figura 2. Diagrama del arreglo experimental de Fizeau.

Con este sistema, si un pulso sale hacia el espejo por la abertura A, y regresa después de reflejarse hacia la rueda en el instante en que el diente B ha girado a una posición que cubre la trayectoria de regreso, entonces el pulso no alcanzará al observador detrás de la rueda. Sin embargo, a una rapidez de rotación mayor de la rueda, podría ocurrir que la abertura C se desplazara de forma que permita al pulso reflejado llegar al observador. Así, conociendo el número de dientes en la rueda y la rapidez angular de la misma, es posible calcular el tiempo entre un pulso (abertura) y el siguiente, es decir, el tiempo de vuelo de la luz. Con este arreglo, Fizeau calculo una velocidad de  $3.15 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Una desventaja del experimento de Fizeau es que, si no se tiene cuidado en el control de la velocidad de rotación de la rueda, es posible que el pulso de luz pase por una abertura posterior a C, lo que podría generar una medición errónea de la velocidad.

Conforme paso el tiempo y evolucionaron las tecnologías para medir tiempos más cortos, se fueron obteniendo mejores resultados (Tabla 1). El último experimento tipo TVL para medir la velocidad de la luz fue realizado por A. Michelson utilizando espejos giratorios, y con lo cual obtuvo un valor de  $(2.99796 \pm 0.00004) \times 10^8 \text{ m/s}$ . A partir de ese momento se implementaron experimentos basados en otras tecnologías más precisas.

Tabla 1. Mediciones de la velocidad de la luz en la historia.				
Año	Autor	Resultado ( $\times 10^8 \text{ m/s}$ )	Incertidumbre ( $\times 10^8 \text{ m/s}$ )	Método
1638	Galileo Galilei	Inconcluso	--	TVL con linternas
1675	Roemer y Huygens	$\sim 2.2$	--	TVL con Lunas de Júpiter
1729	James Bradley	$\sim 3.01$	--	Aberración estelar
1849	Hippolyte Fizeau	3.15	--	TVL con rueda dentada
1862	Leon Foucault	2.98	$\pm 0.005$	TVL con espejo giratorio
1879	Albert Michelson	2.9991	$\pm 0.0005$	TVL con espejo giratorio
1907	Rosa y Dorsey	2.99788	$\pm 0.0003$	Constantes Electromagnéticas
1926	Albert Michelson	2.99796	$\pm 0.00004$	TVL con espejo giratorio
1950	Essen y Gordon-Smith	2.99792	$\pm 0.00003$	Cavidad resonante
1958	K. D. Froome	2.997925	$\pm 0.000001$	Radio Interferometría
1972	Evanson, et. al.	2.99792457	$\pm 0.00000001$	Interferometría láser
1983	Oficina Internacional de Pesos y Medidas	2.99792458	--	Definición convenida

### 3 COMO MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ EN EL VACÍO

En la actualidad, gracias al desarrollo y accesibilidad de la tecnología, usando fotodiodos de respuesta rápida y fuentes de luz láser, es posible generar pulsos de luz similares a los que generó Fizeau, pero con mayor calidad ya que son colimados (con dispersión de intensidad reducida), de alta irradiancia y muy cortos, además de que es posible detectarlos y analizarlos de forma relativamente sencilla.

En particular, a través del uso de un sistema de láser pulsado se pueden producir pulsos de luz de hasta 5ns de ancho, 2ns de subida y frecuencia de repetición del orden de KHz. Esto permite tener precisión en el análisis temporal del retraso del pulso y evitar que pueda ser confundido con otro pulso posterior, como puede ocurrir en el experimento de Fizeau. Por otro lado, un detector rápido, que pueda resolver cambios de intensidad del orden de nanosegundos (idealmente, para recibir una señal de 5ns el ancho de banda del fotodiodo debe ser del orden de más de 200MHz), permitirá medir con precisión la ocurrencia del pulso, ya que si se utiliza un detector con tiempos de respuesta lentos (v.g. resoluciones de microsegundos) la detección de los pulsos en el tiempo puede ser deformada y llevar a mediciones incorrectas de la velocidad. Una vez asegurados estos requisitos, el experimento es sencillo.

Para comenzar, parte de la señal eléctrica rápida (pulso de avalancha) que enciende y apaga el diodo láser, se envía a un Osciloscopio que pueda resolver dichas señales. Si los pulsos son de 5ns, idealmente el osciloscopio debe tener un ancho de banda de 200MHz, sin embargo, es posible trabajar con osciloscopios de menor frecuencia con la desventaja



de que posiblemente deformen el pulso. Esta señal eléctrica será utilizada como “disparador” para realizar mediciones de tiempo con el osciloscopio, es decir, es la señal que le “avisa” al osciloscopio cuando llevar a cabo una medición.

Posteriormente, el láser se coloca en la posición de origen de arreglo experimental. Junto a él se coloca el fotodiodo de detección rápido (incluyendo su fuente de alimentación), teniendo en cuenta el medir la distancia al láser (se recomienda una separación mayor a 20cm para poder colocar otros elementos ópticos en caso de ser necesario). La salida del detector se conecta a otro canal del osciloscopio, que será el “canal óptico” donde se mostrará la señal óptica recibida por el receptor (fotodiodo).

La primera medición tiene el propósito de definir la posición de referencia (el “cero”) que usaremos para el pulso de luz registrado en el canal óptico. Para esto, el láser se apunta hacia el detector y se observa el pulso (señal óptica) recibido en el osciloscopio. Con ayuda de los cursores del osciloscopio se marca la posición del máximo de la señal óptica y se registra el tiempo marcado por el osciloscopio (Figura 3).

A continuación, se giran tanto el láser como el detector de forma que apunten a un espejo colocado a una cierta distancia ( $d$ ). Después de alinear el sistema de forma que el láser incida en el espejo y se refleje hacia el detector, se mide la distancia total recorrida por la luz y se observa y marca la posición del pulso recibido en el osciloscopio (Figura 4).

La diferencia de tiempo entre las dos posiciones de los pulsos corresponde al tiempo de vuelo que tarda la luz en recorrer la distancia extra a los 20cm originales. Así, la velocidad se puede deducir de la diferencia de tiempo entre los dos pulsos y la diferencia de distancia recorrida por la luz en ambos arreglos insertándolas en la ecuación (5). Para tener un mejor resultado con una incertidumbre adecuada, se recomienda realizar varias mediciones a distintas distancias de recorrido y posteriormente deducir la velocidad de la luz haciendo estadística o de un análisis gráfico.

Como comentario, dado que el diodo láser tiene una resistencia para limitar la corriente y una capacitancia interna, la señal eléctrica emitida por su circuito de alimentación (pulso de avalancha) y que es el disparo del osciloscopio, no puede

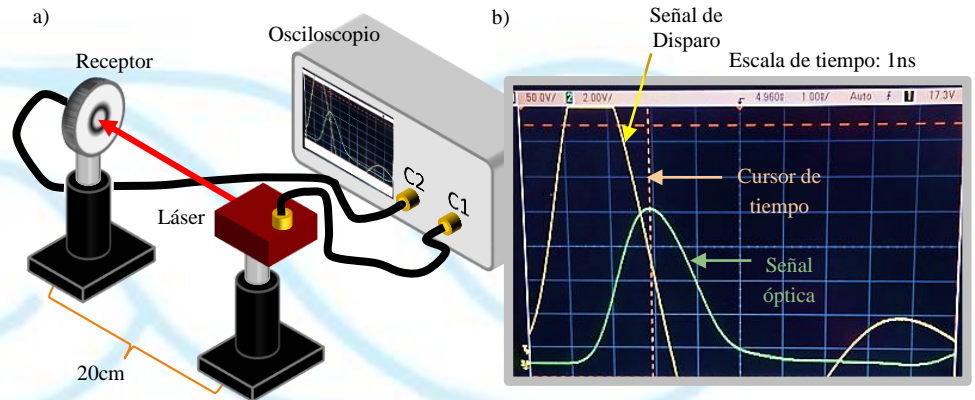


Figura 3. a) Diagrama del arreglo experimental para definir el cero del experimento. b) Ejemplo de las señales observadas en el osciloscopio.

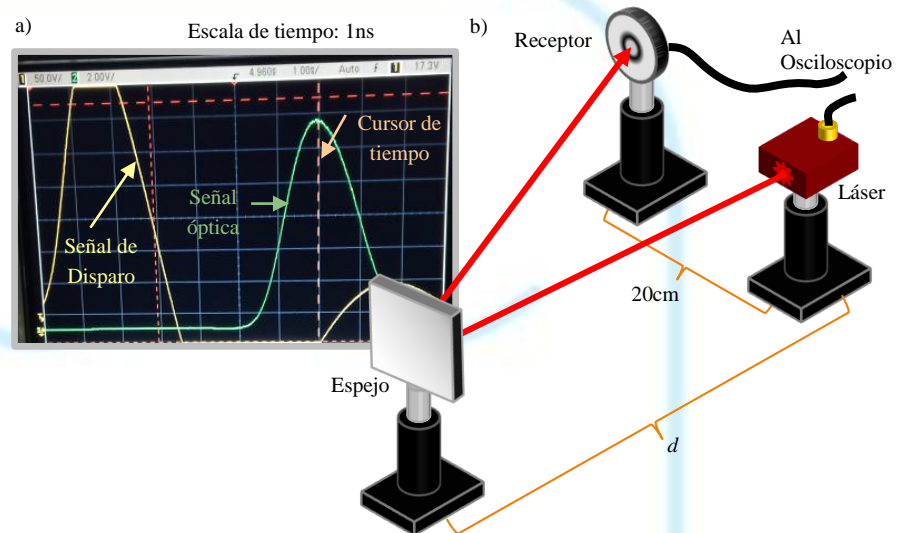


Figura 4. a) Ejemplo de las señales observadas en el osciloscopio correspondientes al, b) Diagrama del arreglo experimental con un recorrido más largo.

ser utilizada directamente como punto de referencia temporal, ya que no enciende el láser de forma instantánea, sino que tiene un cierto tiempo de retraso que varía de un modelo a otro sin que se pueda medir con precisión.

#### 4 REFERENCIAS.

- [1] D. J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. 3<sup>o</sup> ed. Prentice Hall. 1999.
- [2] *21<sup>st</sup> Century Astronomy* J. Hester, et.al. Norton & Company. 2002.
- [3] E Barrios. *Método de Roemer*. Tsikbal Naat. 2025.
- [4] R A Serway, R. J. Beichner. *Physics for Scientists and Engineers*. 5<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill. 2000. Tomo II.