

VELOCIDAD DE LA LUZ

Santiago Capriotti y Daniel Minsky
Instituto Balseiro - Bariloche - Argentina

Se midió la velocidad de la luz por método de tiempo de vuelo, obteniéndose $c = (2.99 \pm 0.04) \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

I. INTRODUCCIÓN

La primer idea para determinar experimentalmente la velocidad de la luz fue obra de Galileo Galilei, pero recién en 1676 el astrónomo Olaf Roemer logró obtener un valor para dicha cantidad, mediante la interpretación de la variación de los períodos de los satélites de Júpiter como producida por el cambio de la distancia entre la Tierra y dicho planeta. El valor obtenido mediante este método no era muy exacto, aunque proporcionaba el orden de magnitud correcto de la velocidad de la luz. El primer experimento que determinó con exactitud, aunque con poca precisión dicho valor, fue realizado por Fizeau en 1849. Su método se basaba en producir un tren de pulsos a partir de un haz continuo utilizando una rueda dentada. El tren de pulsos viajaba una distancia de 9 km , se reflejaba en un espejo para volver a pasar por la rueda dentada. Conociendo la velocidad angular de la rueda, Fizeau pudo determinar un valor para la velocidad de propagación de la luz. Posteriormente el aparato de Fizeau fue modificado por Foucault, quien sustituyó la rueda dentada por un espejo giratorio para conseguir una mayor precisión¹. Actualmente la velocidad de la luz es una constante definida, en base a la cual se determina el patrón de distancia.

El experimento aquí detallado es la realización de la idea de Galileo Galilei para medir la velocidad de propagación de la luz. Galileo había propuesto que, si la luz viajaba a una velocidad finita, dos hombres separados una gran distancia, provistos de linternas y un cronómetro podrían medir dicha velocidad. La experiencia se desarrollaba así: uno de los hombres descubriría su linterna y al mismo tiempo echaba a andar su cronómetro. El otro hombre, a dos millas de distancia del primero, descubra su linterna al ver la otra linterna prenderse. El primer hombre paraba el cronómetro al ver a su vez prenderse la linterna mas alejada. Como se verá a continuación, nuestro experimento es equivalente al imaginado por Galileo, reemplazando a los dos hombres con sus linternas por dispositivos electrónicos de alta velocidad y el cronómetro por un osciloscopio, reduciendo la distancia a pocos metros.

La experiencia consistió en la medición de la velocidad de la luz por el método de tiempo de vuelo. Dicho método se basa en la emisión de pulsos lumínicos (mediante un dispositivo electrónico de alta velocidad) los cuales viajan una distancia determinada y son captados por un receptor electrónico. Se midió el tiempo de vuelo de los pulsos a diferentes distancias. De estas mediciones

fue posible obtener la velocidad de la luz como el cociente entre la distancia recorrida por el pulso y el tiempo que demoró en hacerlo.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El pulso de luz era enviado a través de una lente condensadora de modo de obtener un haz paralelo. Como se muestra en la fig. 1, este haz fue dirigido hacia un espejo retro-reflector para hacer foco en el receptor después de pasar por otra lente condensadora. El espejo retro-reflector se utilizó para variar la longitud del camino recorrido por la luz sin cambiar la disposición del instrumental electrónico, ya que esto podría cambiar el retardo propio de este instrumental. Como se verá más adelante, la constancia de este retardo es importante en la técnica de medición aplicada. La distancia focal de dichas lentes era de aproximadamente 10 cm . Para lograr una correcta alineación de todo el equipo, fue necesario recurrir a una cámara CCD a la cual le fue removido el filtro infrarrojo; de esta manera fue posible observar el spot en un monitor.

El dispositivo electrónico consistía en un LED infrarrojo HFBR-14X4 alimentado con un generador de pulsos. Para la recepción se utilizó un fotodiodo. Las señales del emisor y del receptor se conectaron a un osciloscopio (Tektronix 456B de 200 Mhz) para observar el tiempo de vuelo del pulso como un desfase entre ambas señales.

Se observó que el retardo propio del sistema era independiente de la intensidad del haz, interponiendo un diafragma en el camino del pulso. Al variar la intensidad del pulso en un 50% no se detectó un cambio en dicho retardo. Esto implicaría que el retardo propio del circuito, debido a la inercia de sus componentes, era independiente de la intensidad del haz. Por consiguiente, no tendía efecto sobre el resultado de la medición, ya que para calcular la velocidad de propagación de la luz, importa las variaciones de distancia recorrida en variaciones de tiempo. Se tomaron dos tiempos de la imagen del osciloscopio para obtener una mayor precisión. Siendo que el receptor invertía la señal proveniente del generador (pulso de luz), se midieron los desfases temporales entre el flanco positivo del generador y el flanco negativo del fotodiodo y también entre el flanco negativo del generador y el flanco positivo del fotodiodo. No se midieron los desfases temporales entre flancos iguales para evitar una posible influencia de inestabilidades en la frecuencia del generador.

La base de tiempo del osciloscopio fue calibrada midiendo el período de señales cuya frecuencia se conocía con precisión por haber sido medidas con un frecuencímetro (General Radio 1192b). Un problema a considerar respecto a esta calibración es que durante la medición la base de tiempo del osciloscopio estaba magnificada; esta magnificación se conseguía pulsando un botón. Sin embargo, esta calibración se realizó con la base de tiempo del osciloscopio sin magnificar, debido a que la base de tiempo utilizada durante la experiencia estaba fuera del rango de medición del frecuencímetro.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. DATOS EXPERIMENTALES

Se midieron los desfases temporales entre las señales provenientes del generador y del fotodiodo como función de la diferencia de distancia entre la posición actual del retroreflector y la posición inicial del mismo. Se promediaron los datos correspondientes a los desfases entre el flanco positivo de la señal proveniente del generador de pulsos y el flanco negativo de la señal del fotodiodo, con los correspondientes a los desfases entre el flanco negativo del pulso del generador y el flanco positivo del pulso en el fotodiodo. Se efectuó una regresión lineal en base a estos promedios; la pendiente así obtenida es la inversa de la velocidad de la luz (Fig. 2).

B. CALIBRACIÓN DEL OSCILOSCOPIO

Se midió el período de una señal proporcionada por el generador de pulsos con el osciloscopio y esa misma señal fue medida con el frecuencímetro; se efectuó la regresión lineal de los datos obtenidos (Fig. 3). La pendiente de esta regresión es el factor de corrección de los tiempos medidos durante la experiencia. El factor de corrección es:

$$\alpha = 0,989 \pm 0.006 \quad (1)$$

Si bien el error en la determinación del factor de corrección es comparable con la corrección en sí, el factor α agrega un sesgo a la medición.

C. RESULTADO FINAL

De la gráfica de tiempos de vuelo en función de las distancias recorridas se deduce que la velocidad de la luz es la inversa de la pendiente de la recta:

$$c' = \frac{1}{A} = (3.02 \pm 0.02)ms^{-1} \quad (2)$$

Este resultado debe ser corregido con el factor α :

$$c = \alpha c' \quad (3)$$

En base a la pendiente obtenida y el factor de corrección, se concluye que la velocidad de la luz es:

$$c = (2.99 \pm 0.04) \times 10^8 ms^{-1} \quad (4)$$

Este valor debería ser corregido por el índice de refracción del aire, pero el mismo no resulta significativo dada la dispersión de la medición ($n = 1.00027$ en el espectro infrarrojo²).

IV. CONCLUSIONES

El valor de la velocidad de la luz obtenido fue:

$$c = (2.99 \pm 0.04) \times 10^8 ms^{-1}$$

El error en la medición se debe en partes iguales tanto al error en la determinación del tiempo de vuelo como al error en la calibración de la base de tiempo del osciloscopio. Para mejorar la exactitud de la experiencia se debe utilizar un osciloscopio con mayor ancho de banda y escala de base de tiempo.

APPENDIX A: CIRCUITO RECEPTOR

En la figura 4 se muestra el esquema del circuito receptor. Como sensor se utilizó el fotodiodo HFBR-24X4 de Hewlett Packard. La resistencia R_1 limita la corriente. Los diodos Z_1 y Z_2 se utilizaron para limitar la tensión directa en el fotodiodo y el diodo D_1 para limitar la tensión inversa

¹ F. W. Sears, *Física Universitaria* (Addison Wesley Iberoamericana, Delaware, 1988), p. 823.

² "Handbook of Chemistry and Physics" Ed. CRC

Figura 1

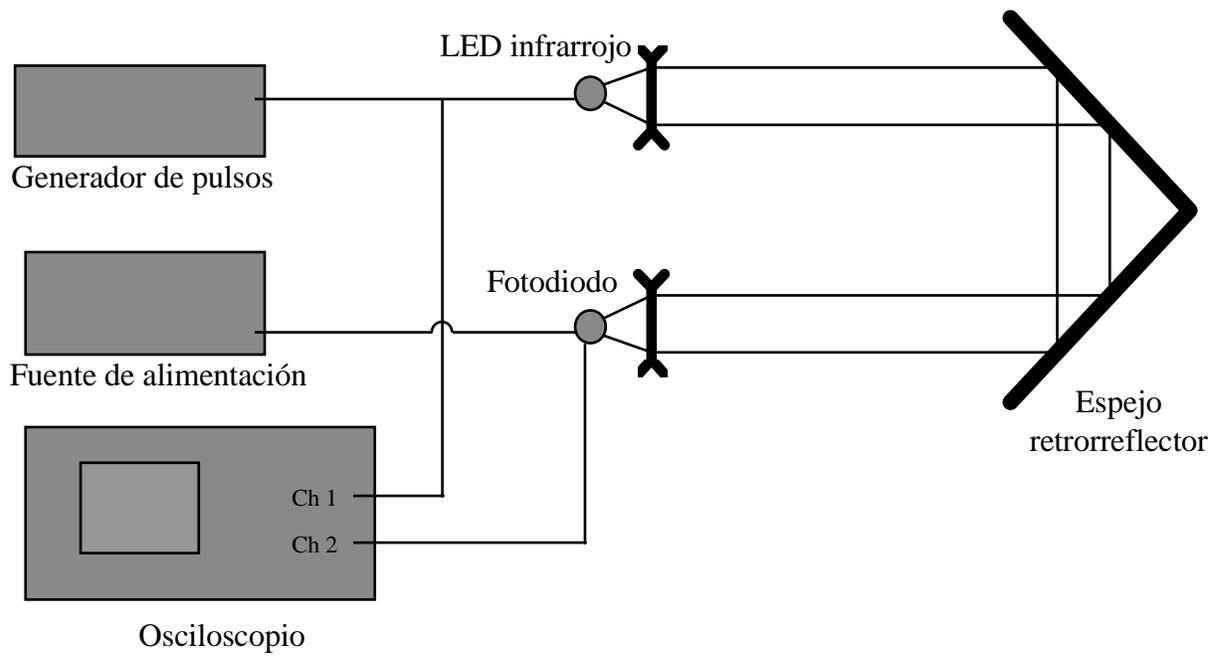


Figura 2

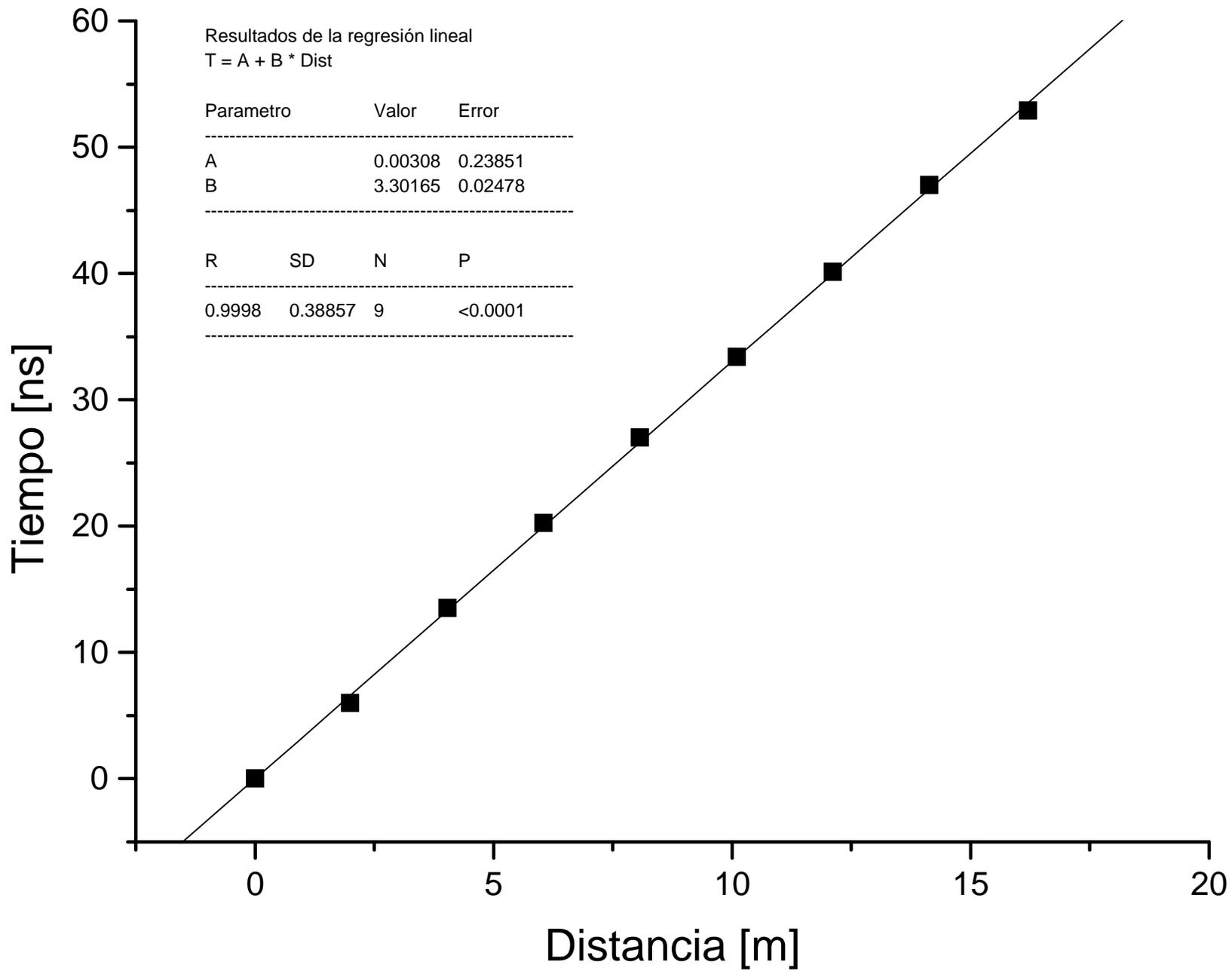


Figura 3

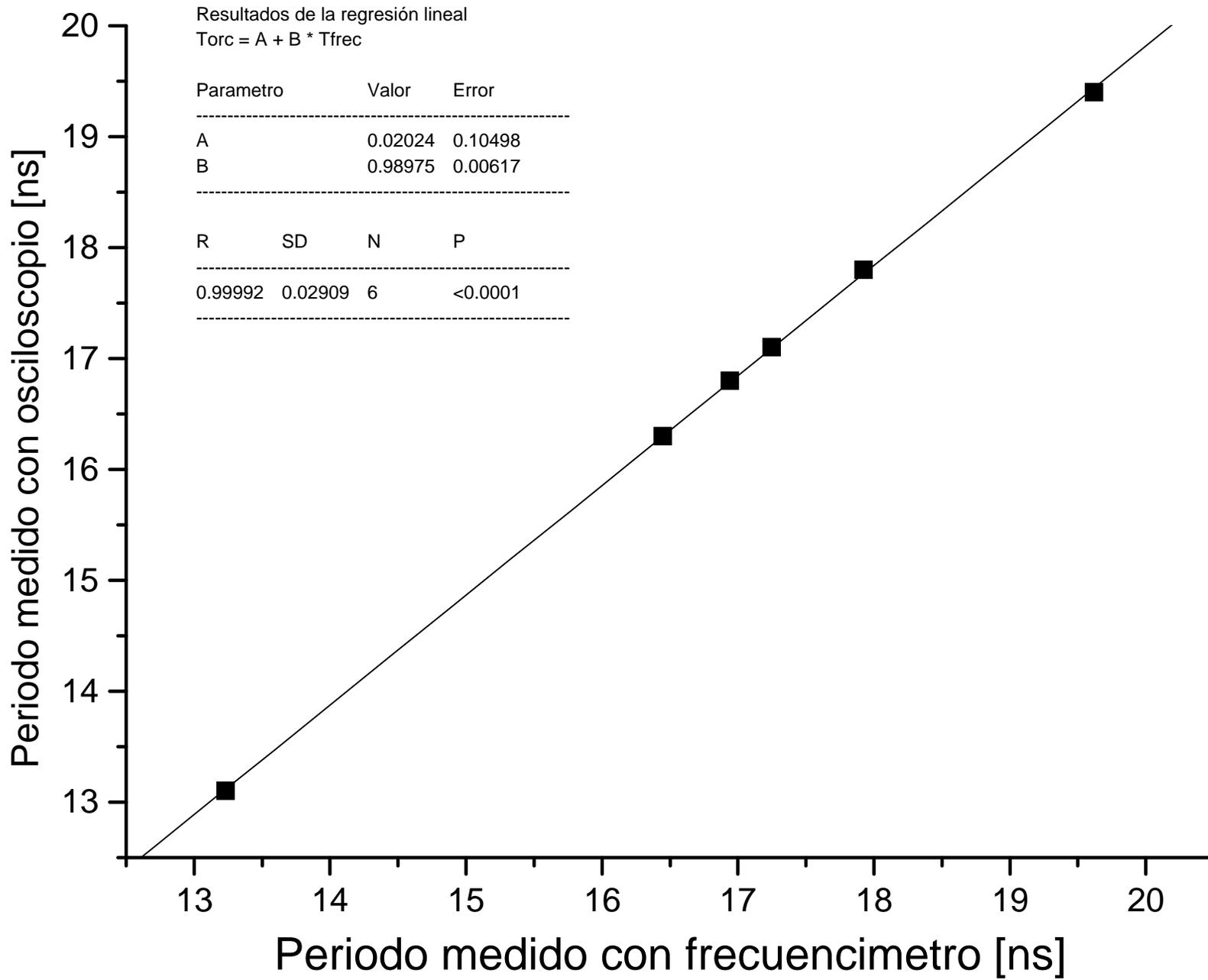


Figura 4

