

*A mis estudiantes del curso “Experimentos de física de ultra-alta precisión 2013-2014” (EFUAP, para los amigos y amigas).*

Pocas historias se le parecen. La medición de la velocidad de la luz puede enhebrar una apariencia de gesta, que une el remoto pasado de la ciencia en ciernes y el más moderno instrumental tecnológico del que dispone el siglo XXI, con una serie de nombres que encadenamos casi arbitrariamente para formar una cadena aparente que hasta puede sonar aburrida de tantos que hay y situaciones que se fueron dando. Solo una descripción somera de los experimentos involucrados a lo largo de 30 siglos de mediciones, podría llenar un buen libro de esos que ocuparían bastante espacio en una biblioteca convencional. La cuestión en estudio es la luz y para caracterizarla, desde siempre se quiso tener una idea comparativa de su velocidad. Para eso, se necesitaba conocer algo de ella, como hacemos ahora si queremos medir la velocidad de un halcón o de una flecha. Eso significa que necesitamos conocer al menos de dónde a dónde se mueve, lo que da dirección y sentido y cuánto espacio recorre en un tiempo bien determinado. Todo esto daba por supuesto que la luz se propaga a velocidad finita, cosa que no fue resuelta hasta casi veinte siglos después de aquellos primeros griegos. En ese sentido, famosa fue la controversia entre los seguidores de Empédocles de Agrigento, que pensaban que dicha velocidad era finita y los de Aristóteles, que pensaban lo contrario: así podrían haber seguido debatiendo hasta la primera medición efectiva, aun desoyendo a Alhazen, quien había proclamado, poco después del año 1011, su finitud usando el argumento de que la luz no podía ser ubicua.

La historia que quiero contar comienza tratando de entender si la luz sale del Sol, por decir algo y llega a los ojos, o sale de estos para llegar a aquel. Este debate fue zanjado mucho antes que la ciencia entrara de lleno en el tema, por fortuna, sin mayores incidentes, así como fue ponerse de acuerdo en que esa velocidad era constante, que no se aceleraba ni disminuía de modo apreciable su valor en la trayectoria de un punto al otro. De modo que, en nuestro ejemplo, la luz sale del Sol y llega a los ojos de Galilei (vamos a dar nombre al científico). La pregunta es ¿se puede saber en cuánto tiempo, según el físico)? El verdadero Galilei (en su intento de 1626 entre colinas de la región Toscana) fracasó y, a pesar de sostener que debía ser finita, aceptó que era al menos tan grande que no podía ser medida. Ahora sabemos que la tecnología de que disponía el sabio italiano era imprecisa porque, efectivamente  $c$  (vamos a darle nombre) es muy grande para los instrumentos en la Tierra.

Sin embargo, en 1676, el estudiante Ole Roemer anunció que, usando un fenómeno observado en el satélite Io de Júpiter (descubierto, por cierto, por Galilei), demostró que la velocidad de la luz tenía que ser 214.000 km/s, un número escalofriante: en un segundo la luz sería capaz de recorrer una distancia equivalente a 5 veces la circunferencia de la Tierra. Y en realidad, Roemer se quedaba corto, pues esa distancia es, en rigor, ¡más de 7 veces! De todos modos esta determinación hizo del tema “velocidad de la luz” una cuestión fundamental en la física y varios institutos e investigadores comenzaron sus planes de medición. Sin pretender mencionar todos ni los detalles de medición, se destaca otro, el astrónomo Bradley, que en 1726/7 dio la pista para un valor más preciso que el de Roemer, unos 301.000 km/s, que podía ser medido gracias a la tecnología de los telescopios y no requería de un evento especial de ningún tipo o asociado a grandes estadísticas, como el método de Roemer. Pero aún quedaba medir la velocidad de la luz en laboratorio.

Ahí entran en juego otros dos estudiantes, unos cuantos años más tarde (digamos 1850 para no dispersarnos mucho), Fizeau y Foucault, quienes siguen los pasos de Arago (colaborador de un genio de la luz: Fresnel) que se estaba quedando ciego (un óptico ciego, todo un hecho de ironía negra) y determinan, de un modo que aún hoy sorprende a sus colegas de casi dos siglos después, la velocidad de la luz en términos terrestres, inclusive de laboratorio y los resultados son consistentes con los astronómicos (298.000 km/s) pero con una incerteza de apenas 500 km/s, mientras que, para los anteriores intentos, es todavía difícil precisarla. Esto no solo es en sí mismo un logro, sino que

permite medir la velocidad de la luz en diferentes cuerpos transparentes (agua, vidrio, etc.) y he aquí que la sorpresa embargaría a tirios y a troyanos en lo que respecta a qué es la luz: para unos, partidarios de que la luz eran partículas como polvo, la luz debía ser más rápida en los medios más densos, para otros, partidarios de la luz ondulatoria, debía ser más lenta. Pues bien: era más lenta y la precisión era tal que no dejaba lugar a dudas.

O sea, las dudas eran cada vez más sobre qué era la luz, pero ya no tanto a qué velocidad se movía. Aún había más: Foucault decidió medir la composición de las velocidades de líquidos (agua) con la de la luz y ahí encontró una discrepancia con la ley de composición que hubiera usado cualquiera que conociera las leyes de la Mecánica de Galilei y Newton. Aplicando la hipótesis de que la luz era una onda que se movía en un éter absoluto (llamado luminífero) Fresnel dio una explicación a este fenómeno, pero el verdadero motivo está en la llamada “Relatividad” de Albert Einstein, que recién fue enunciada en 1905 en forma restringida y en 1915 (¡justo hace un siglo!) en forma general.

El problema de la composición de velocidades no podía ser dejado así, pero debido a que la precisión era aún insuficiente para ciertos experimentos, se intentaron formas muy interesantes de medir  $c$ , hasta que en 1877 el joven Albert Michelson hizo sus primeras determinaciones con precisión que mejoró diez veces las anteriores y fue mejorando aún ese número a lo largo de los años, llegando a determinar la velocidad de la luz en 1926 en 299.796 km/s con una incerteza de escasos 4 km/s. Las mediciones más modernas corresponden a Evanston, en 1973 que arrojaron el valor de 299.792,4574 km/s con una incerteza de 0,001 km/s (¡o sea, 1 m/s!). Ninguna otra medición de la velocidad de la luz ha podido arrojar un número que signifique algún cambio importante, de modo que se ha definido a  $c$  como 299.792,458 km/s sin error, lo que permitió la definición del metro patrón y del segundo patrón a través de la velocidad de la luz, sin necesidad de los antiguos patrones instrumentales en la legendaria oficina de pesas y medidas de París.

Una última anécdota jalona esta cadena arbitraria que he presentado, a saber. En 1865, James Clerk Maxwell presenta una teoría completa del electromagnetismo y lo notable de ella es que se predicen ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, tal como la habían medido para esa época. Unos años después (1887) Hertz encuentra experimentalmente ondas como las predichas por Maxwell, lo cual, ¡fanfarrias y fuegos de artificio!, vendría a confirmarlo, pero está de por medio la famosa  $c$ . Las medidas de Hertz para la velocidad de sus ondas, dejan muchos lugares para la duda pues, siendo parecida, estaba muy fuera de los valores aceptados de  $c$ . No fue sino hasta 1891, año en que Blondlot, en Francia, midió dicha velocidad con mucha mayor precisión que Hertz y encontró que estaba dentro del 1% de la aceptada para la velocidad de la luz, que las teorías de Maxwell pudieron ser aceptadas sin ambages. Blondlot es un nombre olvidado en la historia de la física por un acontecimiento posterior en su carrera científica que no está dentro del horizonte de este artículo.

La tecnología aportó los métodos para aumentar las precisiones requeridas en todas las determinaciones y las interpretaciones teóricas fueron dando elaborados modelos sobre la luz, de modo que hoy, 30 siglos después de Empédocles, no sólo le damos la razón, sino que la gesta sigue y ahora, para hacer que la luz sea tan lenta como queramos, en medios especiales, o para estudiar el Cosmos en su insospechado gigantismo (lo más preciso que tenemos a mano es que el Universo observable mide unos 90 mil millones de años-luz, siendo un año-luz la distancia que recorre la luz en un año (aproximadamente 9,5 billones de km) así que: ¡haga el lector la cuenta!). Nos queda la pregunta, enfatizada por el hecho de que  $c$  sería una velocidad límite, la máxima velocidad que podría algo alcanzar en el Universo: ¿es la velocidad de la luz tremendamente grande porque puede recorrer más de 7 veces la circunferencia de la Tierra en un segundo o es la luz tremendamente lenta porque se toma más de 4 años para llegar a la estrella Próxima Centauri (la más cercana que tenemos a mano, salvo el Sol y eso es apenas comenzar para la exploración del Universo)?