

La luz y su velocidad.

De un debate abstracto a una herramienta metrológica.
Pierre Lauginie.

Un debate bimilenario.

¿Tiene velocidad propia la luz? La respuesta a la pregunta, que ahora nos parece evidente, no lo ha sido durante mucho tiempo.

El debate nació en los comienzos de la ciencia griega, mucho antes de nuestra era. Empédocles de Agrigento, Platón, Aristóteles, Euclides, Lucrecio. Con la excepción de Empédocles, el paradigma dominante sería la instantaneidad del fenómeno luminoso.

La edad de oro de la ciencia árabe (s. X-XI) retoma el debate. Ibn Sinha, llamado Avicena e Ibn al-Haytham, llamado al-Hazen sostuvieron la materialidad y la temporalidad del fenómeno luminoso: *“Lo que va de la apertura (la fuente luminosa) al cuerpo que le hace frente no existe más que un tiempo, incluso si se oculta a nuestros sentidos”.* (Ibn al-Haytham).

El debate vuelve a relanzarse en la primera mitad del s. XVII con Descartes: propagación *sucesiva* en el espacio de una tendencia al movimiento –especie de potencialidad- que, sin embargo, cree *“sin demora”*, *“fuera del tiempo”*. No puede hablarse de velocidad con semejante planteamiento.

Casi simultáneamente, Galileo, como buen ingeniero, invierte los términos del debate: *“¿Tarda tiempo la luz en llegar hasta nosotros? Midámoslo entonces y lo sabremos”*. Su experiencia de las dos linternas no es concluyente, pero importa poco: se ha planteado la cuestión sobre nuevas bases. Una revolución.

Donde la luz tiene velocidad.

La solución –como a menudo ocurre en ciencia- vendrá de un horizonte completamente inesperado. Galileo –una vez más- al descubrir en 1610 las cuatro lunas que orbitan alrededor de Júpiter creyó ver en ellas la solución a un problema mayor: orientarse en tierra y, sobre todo, en el mar. Efectivamente, se trataba de un reloj en pleno cielo. Aunque impracticable en el mar, su método será utilizado durante dos siglos en la cartografía terrestre.

Es el origen de numerosos trabajos sobre los satélites de Júpiter para que suministraran efemérides precisas. Gracias a ellos se evidencian pronto algunas irregularidades del periodo del primer satélite, que luego se llamó “Io”, al parecer correlacionadas con el movimiento orbital de la Tierra. En el Observatorio de París, Roemer se da cuenta de que estas irregularidades solo son aparentes y están relacionadas con el tiempo que tarda en llegar hasta nosotros la luz de Júpiter. En un célebre artículo publicado en 1676, estableció que la luz tarda 22 minutos en atravesar la órbita de la Tierra, es decir el doble de la distancia Tierra-Sol (el valor moderno es de 16' 38"; ver artículo de Suzanne Débarbat en este folleto).

Poco después, en 1690, el holandés Huygens expresó el resultado como una velocidad *“más de seiscientas mil veces superior a la velocidad del sonido. Eso es muy distinto de ser instantánea, como distinto es lo finito de lo infinito”*.

El mundo científico no quedará definitivamente convencido hasta 1728. El inglés Bradley descubre la aberración estelar: una pequeña variación en la posición aparente de las estrellas ligada a la velocidad de la luz. Es análoga, respecto de la luz que nos llega de las estrellas, a la desviación de gotas de agua de lluvia vistas desde un vehículo en marcha. El vehículo es la Tierra, y la

aberración se explica perfectamente si se considera que la luz se desplaza a una velocidad finita.

Bradley, como Roemer, no asigna valor numérico a esa velocidad. Sin embargo, el que puede deducirse de sus datos es muy próximo a los 300.000 km/s.

De este modo, a mediados del s. XVIII, queda definitivamente establecida la finitud de la velocidad de la luz, y su valor *deducido exclusivamente por observaciones astronómicas*, queda en torno a la cifra moderna. Sin embargo, al no entrar este valor en ninguna problemática, tampoco tendrá ninguna aplicación. Sobre ello no habrá novedades relevantes antes de un siglo.

A mediados del XIX, la posibilidad de medir la velocidad de la luz sobre la Tierra suscita un nuevo interés en dos direcciones. Bajo el impulso de Arago se desarrollarán dos tipos de experiencias con finalidades muy diferentes: teórica y epistemológica por una parte, y metrológica por otra.

La naturaleza de la luz: ¿una experiencia “definitiva”?

El debate sobre *la naturaleza de la luz*, relanzado a principios del XVII por Descartes, se cristaliza con Newton y Huygens: o bien una emisión de corpúsculos, o bien una “onda” en un “éter” según el modelo de la onda sonora propuesto por Huygens; o bien un “cuerpo” o bien una “ondulación”.

Tras la preeminencia del modelo corpuscular en el XVIII, la primera mitad del XIX está dominada por la irresistible ascensión del modelo ondulatorio con, especialmente, Young, Fresnel y Arago. En 1840 la suerte del modelo corpuscular está virtualmente echada. Sin embargo, Arago creyó poder proponer una experiencia “crucial” para desempatar ambos modelos:

- El modelo corpuscular, según era entendido en la época, preveía que la velocidad de la luz fuera mayor en el agua que en el aire.
- El modelo ondulatorio preveía la inversa.

¡Hagamos el experimento y –se creyó– la cuestión quedará resuelta!

Foucault y Fizeau en 1850, primero juntos y después por separado, utilizando un dispositivo de espejo giratorio, se lanzaron a una comparación *cualitativa* de las velocidades en el aire y en el agua. Foucault lo con siguió primero: la luz se *frenaba* al entrar en el agua.

El modelo corpuscular fue rechazado. ¿Experiencia “definitiva” entonces? No, aunque esto no fue generalmente apreciado en la época. De hecho, la experiencia de Foucault rechaza, *no todo modelo corpuscular*, sino solamente *una hipótesis muy particular* que se remontaba a Descartes y que condicionaba el modelo de la época: la conservación de la componente de velocidad paralela al plano de separación. ¡Y, medio siglo más tarde, el fotón, esa extraña criatura de Planck y de Einstein, se acomodará perfectamente al resultado de Foucault!

Un instrumento para medir distancias.

Por otro lado, van apareciendo las primeras tentativas de medición absoluta de la velocidad de la luz en el aire. ¿Por qué este interés? ¿Tan importante es el caso?

La no observación de las paralajes estelares¹ ha sido durante mucho tiempo un argumento contra el movimiento orbital de la Tierra. Por primera vez la midió

¹ Paralaje: Generalmente diferencia entre los ángulos de visualización de un punto dado (planeta, estrella), desde dos puntos de observación separados por una distancia conocida (base)

Bessel en 1838 y su valor fue más que de 0,31". La base utilizada es un diámetro de la órbita terrestre, es decir, unos 300 millones de km, o dos veces la distancia Tierra-Sol (llamada "unidad astronómica" u.a.). De aquí la importancia de una determinación precisa de esta distancia.

Sin embargo, el conocimiento independiente de la velocidad de la luz por una medición terrestre permite invertir el razonamiento de los astrónomos.

Por ejemplo, el tiempo que tarda la luz en atravesar la órbita de la Tierra se conoce a partir de la observación de los satélites de Júpiter; combinándolo con la velocidad de la luz, se obtiene el diámetro de dicha órbita. Además, una medición de aberración "en el cielo", combinada con la velocidad de la luz, nos lleva también a la distancia Tierra-Sol. Esto es lo que comprendió Arago. La velocidad de la luz entrará entonces en el dominio de la Metrología.

La primera determinación terrestre fue efectuada por Fizeau en 1849 gracias a un dispositivo de rueda dentada que "fragmenta" un haz luminoso enviado de ida y vuelta desde Suresnes a Montmartre (Fig. 1). Fizeau lo cifró en 315.000 km/s, valor sensiblemente superior al de los astrónomos. Pero no se trataba todavía de una determinación definitiva. Citemos a Arago: *"La repetición de observaciones con aparatos cada vez más perfectos mecánicamente permitirá un día, sin salir de París y sus alrededores, encontrar esta paralaje del Sol² que, a mediados del último siglo, dio lugar a viajes tan largos, tan lejanos, tan penosos y tan costosos"*.

Doce años después, Le Verrier, director del Observatorio, pide a Foucault que adapte su experiencia cualitativa de 1850 a una medida cuantitativa precisa. En efecto, sus cálculos de las interacciones mutuas de los planetas le hacen pensar que los valores de la distancia Tierra-Sol dados por los astrónomos, como el deducido por Fizeau, están sobredimensionados un tanto. Foucault lleva a cabo la experiencia en 1862 (Fig. 2) y publica 298-000 km/s. Le Verrier está satisfecho. Desde entonces la velocidad de la luz es, potencialmente, el instrumento ideal para medir las distancias. Para remate, la guinda: al revés que con las paralajes planetarias, este nuevo método es independiente de la geometría y las dimensiones de la Tierra: un gigantesco salto virtual en el espacio.

Esta adaptación de una experiencia inicialmente cualitativa a un experimento preciso de Metrología constituye una rica ilustración de las tecnologías de la época y de su evolución: tiene en cuenta las matemáticas avanzadas para diseñar la turbina de arrastre del espejo (Fig. 3), detalles mecánicos refinados, recurre al célebre organero de la época – Cavallé-Col- para la construcción del fuelle que moverá la turbina (Fig. 4), construcción de un reloj estroboscópico de alta precisión. (Fig. 5).

Tras Foucault, la velocidad de la luz no es todavía la constante fundamental que conocemos, "independiente de todo", tanto del movimiento de la fuente como del observador. Con todo, los primeros indicios que enturbian esta independencia se remontan al siglo XVIII con la observación de las primeras estrellas dobles, y a las experiencias de Arago y Fresnel a principios del XIX. El siglo vivirá con este problema latente. Pero sabemos cómo sigue la historia: esta independencia, resituada en el marco de una teoría general –la Relatividad de Einstein- hace hoy más valiosa esta herramienta para la medida de distancias.

² Paralaje del Sol: ángulo bajo el que el radio de la Tierra se ve desde el centro del Sol. Esto equivale a conocer su distancia.

Las dos experiencias de Foucault, 1850 y 1862, basadas en el mismo principio, realizadas en parte con el mismo material y siendo el mismo experimentador, son emblemáticas de las dos grandes categorías de experiencias científicas. Por una parte, las experiencias con finalidad epistemológica: establecer, ilustrar una ley o un modelo, refutar o validar teorías. Por otra, las experiencias de precisión de la Metrología: en este último caso nadie sabe por adelantado el resultado “verdadero”. Y es muy diferente. Léon Foucault ha brillado en ambos campos.

Para saber más:

William Tobin, (2002) *Léon Foucault*, Les Ulis, EDP-Sciences.

Les magiciens de la lumière, un film du SCAVO, Université Paris-Sud, Faculté d’Orsay.

Figuras:

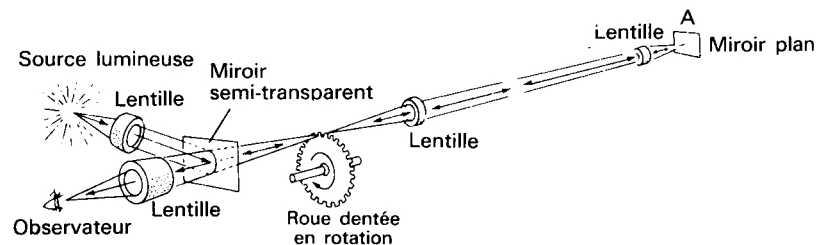


Fig. 1- Esquema de la experiencia de Fizeau. La velocidad de la rueda dentada se ajusta de modo que el haz, que pasa por el hueco a la ida, cae sobre un diente a la vuelta. De aquí se deduce el tiempo de ida y vuelta.

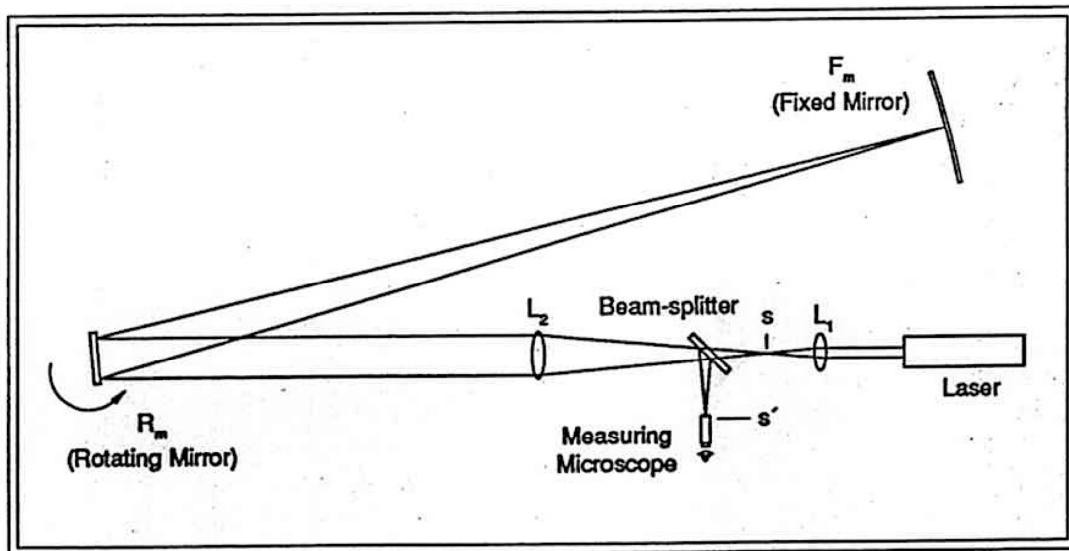


Fig. 2- Principio de la experiencia del espejo giratorio de Foucault. Esquema del montaje pedagógico utilizado hoy en la enseñanza (modelo PASCO). Durante la ida y vuelta de la luz entre los dos espejos, el giratorio ha pivotado ligeramente, de manera que el haz de retorno se reenvía en una dirección diferente de la incidente. De ello se deduce el tiempo de ida y vuelta de la luz.

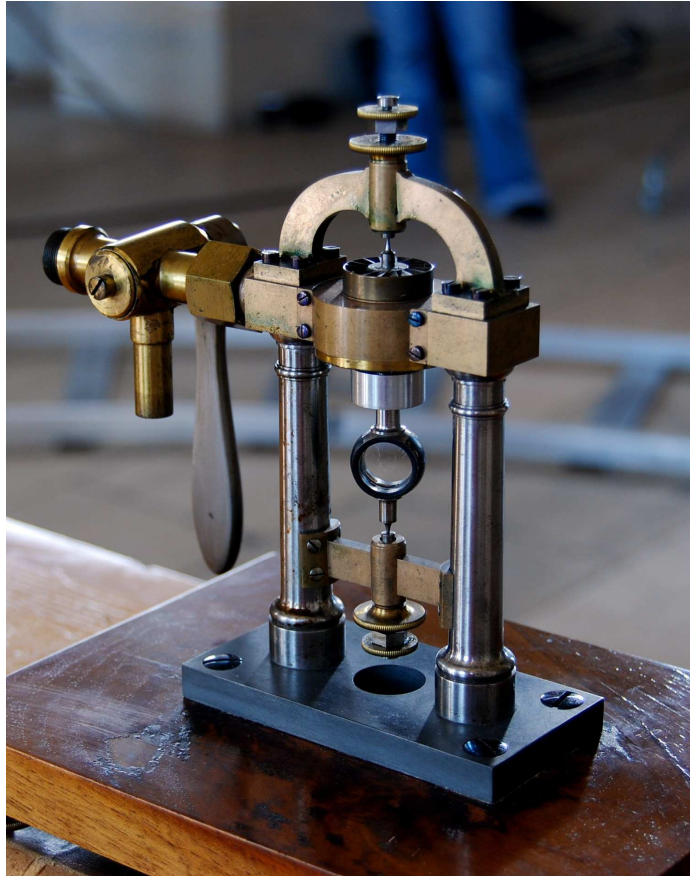


Fig. 3- El espejo giratorio de Foucault (Observatorio de Paris) y su turbina. Nótese que ha perdido el azogue.



Fig. 4- El fuelle de Cavallé-Col (Museo de Artes y Oficios, París) que alimenta la turbina del espejo giratorio.



Fig. 5- El reloj estroboscópico. El reloj arrastra un disco dentado (delante) que permite la medida de la velocidad de rotación del espejo por efecto estroboscópico.