

## CAPÍTULO III

## VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA LUZ

## I

PRIMEROS ENSAYOS—MÉTODO DE RÖEMER: VELOCIDAD DE LA LUZ MEDIDA POR LOS ECLIPSES DE LOS SATÉLITES DE JÚPITER

Los antiguos no creían que la luz invertiera algún tiempo, por pequeño que fuese, en pasar del foco al punto iluminado por ella, del punto luminoso al ojo. En su concepto, esta trasmisión era instantánea.

Bacon fué el primero, entre los modernos, que emitió la hipótesis de que la velocidad de propagación de la luz no es infinita, y Galileo fué asimismo el primero que trató de averiguar prácticamente cuál era esta velocidad. Hé aquí de qué medio se valió: Dos observadores, provistos cada cual de una lámpara, se situaban de noche á 2,000 metros de distancia, habiendo convenido de antemano en que uno de ellos ocultaría su luz con una pantalla y que el otro haría lo propio en el preciso momento en que viese desaparecer la primera luz. Claro está que si el primer observador hubiera podido notar un intervalo de tiempo mensurable entre el instante en que tapaba su lámpara y el en que notaba la desaparición de la segunda, dicho intervalo hubiera sido doble del que la luz invierte en recorrer la distancia que separaba en línea recta los dos puntos de observación. Pues bien, no les fué posible apreciar ninguna diferencia de tiempo entre ambos fenómenos: las dos luces se apagaban al parecer á la vez. Los experimentos de Galileo, repetidos por los físicos de la Academia del Cimento á distancias triples de la primera, no produjeron resultado alguno.

Descartes, que tenía ideas especiales sobre la naturaleza de la luz, opinaba que su trasmisión es absolutamente instantánea. Considerando los

focos luminosos como asiento de una agitación que se trasmite á cualquier distancia por el intermedio de cuerpos duros y contiguos, comparaba el movimiento de la luz al de un palo, uno de cuyos extremos se mueve en el mismo momento en que se hace vibrar el otro (1). Así pues, para él la velocidad de la luz era infinita, y

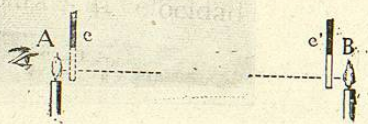


Fig. 15.—Experimentos de Galileo. Primer ensayo de medición de velocidad de la luz

creía ver la confirmación de sus ideas acerca de este punto en un fenómeno astronómico en el que debiera haberse notado la influencia de la propagación sucesiva de la luz si fuese positiva.

Este fenómeno es el de los eclipses de Luna.

Sabido es que hay eclipse de Luna, cuando en la época de la oposición ó del plenilunio, los tres astros se hallan en línea recta. En otros términos, las longitudes del Sol y de la Luna deben en tal momento diferir en 180 grados, como lo indica la figura 16. Pero si la luz invierte un tiempo  $t$  en recorrer la distancia TL, el observador no verá la Luna en oposición sino  $t$  segundos después de su verdadero paso por L estará pues en L', y Descartes deducía de aquí que se vería desde la Tierra la Luna eclipsada en un punto del cielo que no estaría ya opuesto diametralmente al Sol. Como la observación no permitía comprobar nada de esto, deducía además que la luz tiene una velo-

(1) Conviene hacer notar que el hecho mismo de la instantaneidad del movimiento del palo en sus dos extremos, hecho que sirve á Descartes de término de comparación, no es exacto. Tan luego como el cuerpo sólido que se somete á una presión ó una tracción tiene la suficiente longitud, se advierte que el movimiento invierte un espacio de tiempo muy apreciable en propagarse de un extremo á otro.

cidad infinita ó que se trasmite instantáneamente.

Huygens respondió á este argumento de Descartes haciendo observar que la distancia de la Luna á la Tierra es demasiado pequeña para que el retraso del principio ó del fin de un eclipse sea apreciable con nuestros medios de observación. Pero debemos añadir, con todo el respeto debido á los sabios que han reproducido la objeción y la respuesta, que ni una ni otra son fundadas, por cuanto en el fenómeno

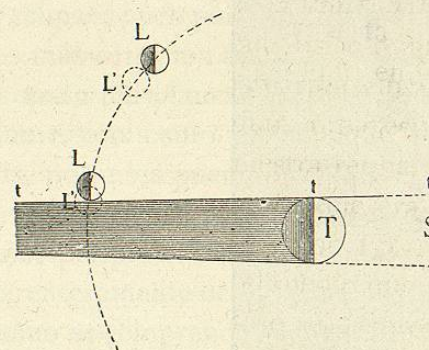


Fig. 16.—Posiciones relativas del Sol, de la Tierra y de la Luna en el momento de un eclipse

de los eclipses, lo propio que en los demás fenómenos lunares, no interviene, como creía Descartes, la trasmisión sucesiva de la luz; es tan sólo causa de un retraso (constante para una misma distancia) en la observación del fenómeno; pero este último aparece siempre en la verdadera dirección en que tiene efecto, si se considera inmóvil á la Tierra; y si no lo está, la desviación (que es la aberración) depende de la velocidad de la Tierra, no de la distancia del objeto observado.

En tal estado se hallaba el asunto, esto es, indeciso, cuando en 1675 el astrónomo dinamarqués Rømer, llamado al Observatorio de París por Picard, tuvo ocasión de compulsar muchas observaciones de los satélites de Júpiter. Al examinar y discutir los eclipses del primer satélite ó sea del más inmediato al planeta, llamósele la atención ciertas diferencias entre los intervalos que median entre estos eclipses sucesivos y que tan pronto se notaban en un sentido como en otro, no siendo posible explicarlas por ninguna desigualdad en el movimiento del satélite. Rømer comprendió al punto que la causa de estas anomalías procedía del cambio de distancia entre la Tierra y Júpiter,

ter, y del tiempo que la luz invertía en recorrer estas distancias desiguales.

Hé aquí cómo refiere la *Historia de la Academia de 1876* el descubrimiento del astrónomo danés.

«Estando calculadas con exactitud y en crecido número las revoluciones del primer satélite de Júpiter, y por consiguiente todos sus eclipses causados por la sombra del planeta, resultaba que en ciertas épocas salía de la sombra algunos minutos más tarde y en otras más pronto de lo que hubiera debido hacerlo, no acertándose á ver ningún motivo para esta variación. Comparando Rømer dichos períodos, vió que el satélite tardaba más en salir de la sombra precisamente cuando la Tierra se alejaba de Júpiter á causa de su movimiento anual, y ménos cuando se acercaba á él; y á consecuencia de esto ocurriósele la ingeniosa conjetura de que tal vez empleara la luz algún tiempo en difundirse. Esta suposición le indujo á pensar que si el satélite tardaba más en salir de la sombra cuando estábamos más distantes de él, no era porque en efecto saliera más tarde, sino porque su luz invertía más tiempo en llegar á nosotros, porque habíamos huido de ella, por decirlo así. Por el contrario, cuando íbamos á su encuentro, debía parecerse más corta la permanencia del satélite en la sombra.

»Para comprobar la certeza de esta opinión, calculó la diferencia que podía haber entre las salidas de la sombra ó emersiones del satélite y los diferentes alejamientos de la Tierra, y vió que la luz retrasaba once minutos por una diferencia de distancia igual á la de la Tierra al Sol.»

En breve manifestaremos el valor que resulta para la velocidad de la luz del método inaugurado por el descubrimiento de Rømer, cuando se introdujeron en los datos del problema los elementos más precisos de la astronomía contemporánea. Pero antes, prosigamos ocupándonos del método mismo con algunos detalles y procuremos hacer comprender su principio con toda claridad.

Supongamos que un fenómeno luminoso, la inflamación de un poco de pólvora, por ejemplo, se reproduzca periódicamente á intervalos iguales con todo rigor, como de 10 en 10 minutos por ejemplo. Sea cualquiera la distancia



á que se halle el observador del punto en que ocurre el fenómeno, es evidente que empezando á contar desde la primera explosion, se sucederán todas las demás con intervalos sucesivos de 10 minutos, sea la velocidad de la luz pe-

queña, considerable ó infinita, con tal que el observador permanezca á una distancia constante del punto en que se efectúan las explosiones.

Pero si el observador se aleja á partir del

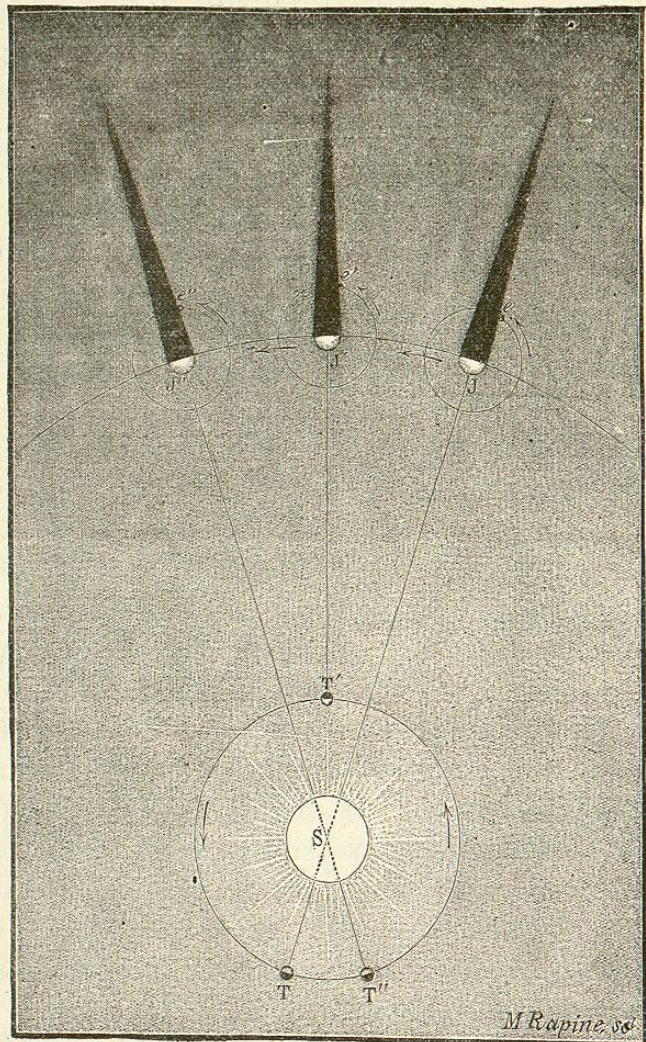


Fig. 17.— Medida de la velocidad de la luz por medio de los satélites de Júpiter

instante en que vió la primera explosion, es indudable que notará un retraso á cada una de las explosiones siguientes, cuyo retraso irá aumentando, y tendrá por causa el tiempo que la luz emplea en recorrer el camino indicado por el aumento de las distancias. A la duodécima explosion, por ejemplo, si se ha alejado 20 kilómetros y ha notado un retraso de 2 segundos, deducirá que la luz recorre 10 kilómetros por segundo. La misma consecuencia puede deducirse de un experimento análogo, si en vez de la aparición de un punto luminoso, fuese objeto de la observacion la desaparicion periódica de una luz.

Pues bien, en el cielo ocurre un fenómeno de esta última clase. El planeta Júpiter va

acompañado, en su movimiento de traslacion alrededor del Sol, de cuatro satélites ó lunas que giran periódicamente en torno suyo. Los planos de las órbitas de estos pequeños astros coinciden, ó poco menos, con el de la órbita de Júpiter, y como este planeta es opaco, proyecta tras sí un cono de sombra cuyo eje tiene cierta inclinacion respecto del plano de su órbita. De aquí resulta que los satélites en sus revoluciones sucesivas alrededor del planeta central, suelen atravesar este cono en la época de sus oposiciones. Durante todo el tiempo que invierten en recorrer la sombra queda interceptada la luz que reciben del Sol, y sufren por tanto un eclipse.

Los eclipses de los satélites de Júpiter son

muy frecuentes, especialmente los de los tres más próximos al planeta, siendo fácil observar desde la Tierra sus inmersiones y emersiones, valiéndose de un anteojito de mediana potencia. Cuando el punto luminoso, arrastrado por su movimiento de revolucion alrededor del planeta, penetra en el cono de sombra, se apaga su luz: este es el instante de la *inmersión*. Continúa entonces su marcha hasta el instante en que, saliendo del cono, vuelve á aparecer su luz: este es el momento de la *emersión*. Desde la Tierra no son visibles ambos fenómenos en un mismo eclipse; pues por lo que hace á los dos satélites más cercanos á Júpiter, los oculta el cuerpo opaco del planeta tanto en el momento de su inmersión como en el de la emersión. Además, no se les puede observar en manera alguna en la época de la conjunción ni de la oposición, porque entonces el cono de sombra se halla enteramente oculto por el disco del planeta, como se comprende fácilmente examinando la figura 17. También se comprende con no menor facilidad porqué son visibles para nosotros las inmersiones desde la época de la conjunción á la de la oposición siguiente, al paso que las emersiones son, por el contrario, visibles de la oposición á la conjunción.

Con efecto, Júpiter camina en el mismo sentido que la Tierra, pero se mueve en su órbita con mayor lentitud que esta: cuando la Tierra está en T y Júpiter en J, en la prolongacion del radio vector T S, es la época de la conjunción. A contar desde este instante, describe la Tierra cierto arco en su órbita y Júpiter otro arco de menor amplitud en la suya, de modo que el observador se encuentra trasportado hácia la derecha del cono de sombra de Júpiter y desde este momento puede ver las inmersiones de los satélites. Las mismas circunstancias se reproducen cuando estando la Tierra en T', Júpiter se halla en J', en la prolongacion del radio como ántes, pero al lado opuesto al Sol, es decir, hasta la oposición. Entonces, debido á los movimientos simultáneos de la Tierra y Júpiter, se dirige el primero de estos planetas á la izquierda del cono de sombra proyectado por el segundo, y en este caso son visibles las emersiones de los satélites hasta la nueva conjunción T'' J''.

Comprendidos estos preliminares, nos será

ya fácil explicar cómo han podido los astrónomos deducir la velocidad de la luz por las observaciones de los eclipses de que acabamos de hablar.

Consideremos, por ejemplo, el primer satélite, esto es, el que se encuentra más cerca del planeta (1). Su movimiento de revolucion se conoce con bastante exactitud para poder calcular fijamente los intervalos de sus eclipses, es decir, los intervalos que separan dos inmersiones ó dos emersiones consecutivas. Ahora bien, la observacion indicó á Rømer y á todos los observadores que le sucedieron que las duraciones de estos intervalos no son constantes; parece que se acortan á medida que la Tierra se acerca á Júpiter, aumentando por el contrario cuando se aleja; en las épocas en que las distancias entre ambos astros tienen poca variacion permanecen sensiblemente iguales los períodos. Si se calcula, pues, segun la duracion media de los intervalos que separan dos inmersiones consecutivas, la época de una inmersión futura, y se compara el resultado del cálculo con el que se obtiene de la observacion, se nota que el fenómeno parece retardarse si la Tierra se aleja de Júpiter, y parece que se adelanta si por el contrario se acercan ambos cuerpos. Por otra parte, el atraso y el adelanto están siempre en proporcion exacta del aumento y de la disminucion de la distancia de entrambos planetas.

No es pues dudoso que la diferencia entre el resultado del cálculo y el de la observacion proviene del tiempo que invierte la luz en recorrer las distancias desiguales de que acabamos de hacer mencion.

Delambre ha deducido de la discusion de más de 100 eclipses de los satélites de Júpiter que de la conjunción á la oposición ó de esta á aquella, las acumulaciones sucesivas de estas diferencias producian un adelanto ó un retroce-

(1) Por muchas razones se ha elegido con preferencia el primer satélite: se conocen con más precision los elementos de su órbita, que es casi circular; el plano coincide ó poco menos con el de la órbita de Júpiter, de suerte que ocurren los eclipses á cada revolucion, siendo por tanto muy frecuentes, toda vez que la duracion de la revolucion del satélite no es más que de  $1 \frac{3}{4}$  días. Su distancia media al centro de Júpiter es sólo igual á seis radios del planeta; á esta distancia la penumbra que acompaña al cono de sombra es casi insensible, de suerte que el eclipse del punto luminoso se efectúa de un modo más brusco, con mayor limpieza, y por consiguiente es más precisa la observacion del momento de la desaparicion ó de la emersión.