

rigurosamente la del Sol; si la pantalla estuviese colocada oblicuamente á la dirección de los rayos de luz, dicha forma sería elíptica.

Así se explica por qué en la sombra proyectada por un árbol, la luz que penetra entre los intervalos de las hojas tiene siempre la forma circular ó elíptica (fig. 418), según que los rayos caen perpendicular ú oblicuamente sobre el suelo.

Durante los eclipses de Sol, puede observarse que estas imágenes del astro presentan la forma de una media luna luminosa, tanto más escotada cuanto mayormente lo esté el disco solar: en el caso de que el eclipse de Sol sea anular, la imagen lo será también.

Si la ventana de la cámara obscura está enfrente de un paisaje iluminado por el Sol



Fig. 419.—Imágenes producidas en la cámara obscura

y aun por la luz difusa reflejada por un cielo despejado, se reproducirá en la pantalla la imagen de cada objeto, imagen invertida como acabamos de ver, y de este modo se obtiene una reproducción fiel del paisaje (fig. 419). Si la pantalla es muy blanca, aparecerán admirablemente pintados todos los objetos con sus colores y matices, siendo más ricos y delicados los detalles cuanto más pequeña sea la abertura y más distante esté el paisaje.

Antes de pasar más adelante, y para facilitar el lenguaje, debemos decir lo que se entiende por *rayo*, por *pincel* y por *haz luminoso*. Dase el primer nombre á la serie de puntos considerados simultánea ó sucesivamente de que se compone cualquiera de las líneas seguidas por la luz; el segundo, al conjunto de un corto número de rayos emanados del mismo punto, y el de *haz* á la reunión de muchos rayos paralelos.

Como se ve, los pinceles luminosos no son otra cosa sino pirámides ó conos que tienen su vértice en un punto cualquiera del foco; pero cuando éste se halla á bastante distancia, como sucede con el Sol y las estrellas, los rayos que parten de un punto del foco tienen tan escasa divergencia que se los puede considerar como rigurosamente paralelos.

### CAPÍTULO III

#### VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ

##### I

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

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

Bacón 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. He 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

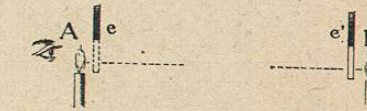


Fig. 420.—Experimentos de Galileo. Primer ensayo de medición de velocidad de la luz

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 transmisión es absolutamente instantánea. Considerando los focos luminosos como asiento de una agitación que se transmitía 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 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 centros de 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

(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.

indica la figura 421. 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 velocidad infinita ó que se transmite 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 de los eclipses, lo propio que en los demás fenómenos lunares, no interviene, como lo creía Descartes, la transmisión sucesiva de la luz; es tan sólo causa de un retraso (constante para una

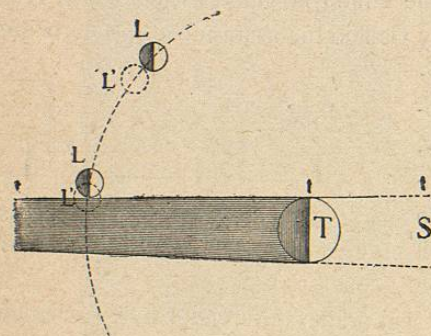


Fig. 421.—Posiciones relativas del Sol, de la Tierra y de la Luna en el momento de un eclipse

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, llamaronle 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 y del tiempo que la luz invertía en recorrer estas distancias desiguales. He aquí cómo refiere la *Historia de la Academia de 1676* este descubrimiento. "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 anuo, y menos 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 huído de ella, por decirlo así. Por el contrario, cuando íbamos á su encuentro, debía parecernos 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 para 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

las salidas de la sombra ó emersiones del satélite y los diferentes alejamientos de la Tierra, y vió que la luz retrasaba once minutos para 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

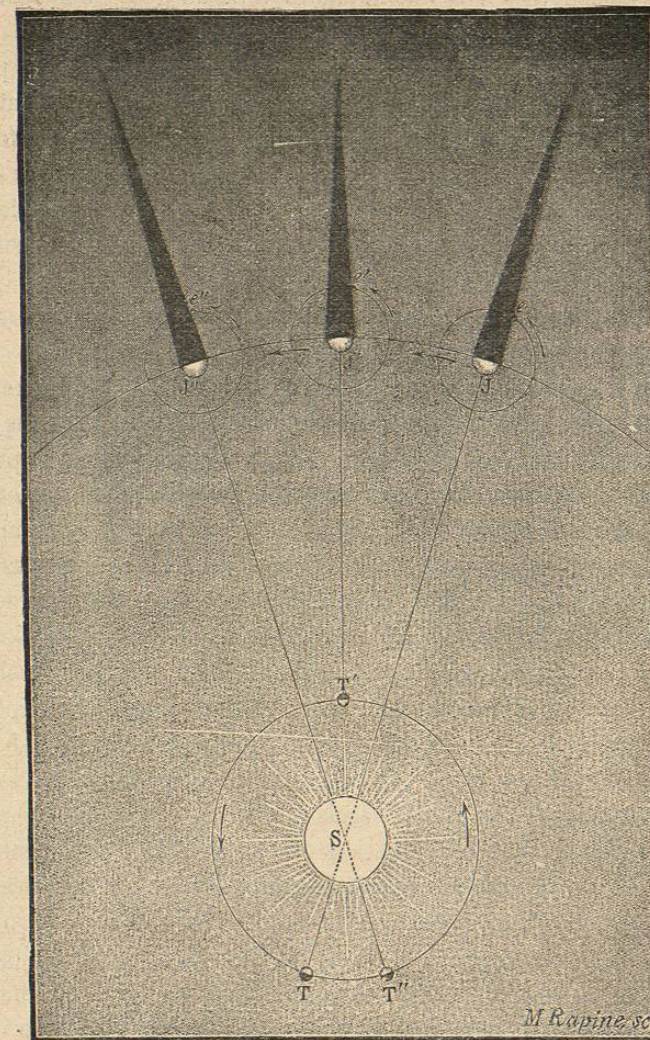


Fig. 422.—Medida de la velocidad de la luz por medio de los satélites de Júpiter

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 explosión, se sucederán todas las demás con intervalos sucesivos de 10 minutos, sea la velocidad de la luz pequeña, 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 instante en que vió la primera explosión, 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 explosión, 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 observación la desaparición 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 traslación 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 inclinación 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 antejo de mediana potencia. Cuando el punto luminoso, arrastrado por su movimiento de revolución 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 422. También se comprende con no menor facilidad por qué 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 ésta: cuando la Tierra está en T y Júpiter en J, en la prolongación del radio vector TS, 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 transportado hacia 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 prolongación del radio como antes, 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 revolución 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 observación indicó á Røemer 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 variación permanecen sensiblemente iguales los períodos. Si se calcula, pues, según la duración 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 observación, 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 retraso y el adelanto están siempre en proporción exacta del aumento y de la disminución de la distancia de entramos planetas.

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

Delambre ha deducido de la discusión de más de 100 eclipses de los satélites de Júpiter, que de la conjunción á la oposición, ó de ésta á aquella, las acumulaciones sucesivas de estas diferencias producían un adelanto ó un retroceso total de unos 16<sup>m</sup> 26<sup>s</sup>,5 (2). Pues bien, las distancias T J, T'' J'' exceden de la distancia T' J' la misma cantidad, que es precisamente el diámetro de la órbita terrestre. La luz necesita, pues, 16 minutos 26 segundos para recorrer la longitud de este diámetro, ú 8 minutos 13 segundos (493<sup>s</sup>,243) para recorrer su mitad, que es la distancia del Sol á la Tierra.

Esto sentado, si se divide el número que marca la distancia media de la Tierra al Sol por 493,243, se tendrá la velocidad de la luz, es decir, el número de kilómetros que atraviesa en un segundo de tiempo medio:  $V = \frac{D}{t}$ .

En tiempo de Røemer no se había podido aún calcular la distancia del Sol sino con mediana aproximación; hemos visto además que tampoco se conocía con exactitud el número  $t$ , de suerte que se valuaba hartamente rudimentariamente la velocidad real de la luz. Los trabajos de Delambre han dado á conocer  $t$  con cierta precisión de la cual no ha sido posible pasar, en cuanto á la distancia ó á la paralaje del Sol, los pasos de Venus de 1761 y 1769 permitieron calcularla con una aproximación mucho mayor que las evaluaciones anteriores. Más adelante indicaremos los diferentes valores que resultarían, para la velocidad de la luz determinada con arreglo á este primer método, de la adopción de tal ó cual valor de la paralaje solar.

(1) Por muchas razones se ha elegido con preferencia el primer satélite: se conocen con más precisión 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 revolución, siendo por tanto muy frecuentes, toda vez que la duración de la revolución del satélite no es más que de 1  $\frac{3}{4}$  día. 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 observación del momento de la desaparición ó de la emersión.

(2) Røemer obtuvo por resultado 11 minutos como tiempo que la luz invierte en recorrer el diámetro de la órbita terrestre; otros sabios dedujeron cifras más altas: Duhamel 15<sup>m</sup>, Horrebow 14<sup>m</sup> 7<sup>s</sup>, Cassini 14<sup>m</sup> 10<sup>s</sup>, Newton 7<sup>m</sup> 30<sup>s</sup>, y por último Delambre, según hemos dicho, 8<sup>m</sup> 13<sup>s</sup>, ó más exactamente, 493<sup>s</sup>,243.

Lo que conviene retener del descubrimiento de Rømer es que ha patentizado la propagación sucesiva de la luz en los espacios interplanetarios, y por vez primera ha hecho posible la determinación numérica de la velocidad con que tiene efecto esta propagación. Pero dicho descubrimiento contiene varias causas de incertidumbre, una de las cuales consiste en la dificultad con que tropiezan los observadores para anotar con precisión el momento de la desaparición del satélite. Esta desaparición no es instantánea, porque se trata de un cuerpo de dimensiones finitas, de un disco luminoso que penetra poco á poco en el cono de sombra, y según la potencia de los anteojos con que se observe el fenómeno, así parecerá más ó menos retrasada la completa desaparición del punto luminoso; observación que, si bien en sentido inverso, cabe hacer con respecto á las emersiones de los satélites. Otra causa de incertidumbre, y la más importante por cierto, es la que procede del valor que se adopte para la paralaje solar.

## II

## LA ABERRACIÓN. — VELOCIDAD DE LA LUZ COMPARADA CON LA DE LA TIERRA

En 1675, Rømer vió que la luz necesitaba cierto espacio de tiempo para llegar á mayor ó menor distancia y calculaba aproximadamente, si no la velocidad absoluta de esta transmisión, por lo menos la que emplea un rayo luminoso para recorrer de punta á punta el diámetro de la órbita terrestre. A los cincuenta años de este memorable descubrimiento, esto es, en 1725, el astrónomo inglés Bradley halló en un fenómeno celeste mucho más general que los eclipses la confirmación de los resultados obtenidos por Rømer. La *aberración* es en efecto una consecuencia inmediata de la velocidad de la luz combinada con la de traslación de la Tierra alrededor del Sol.

Así como Rømer, al emprender el estudio de los satélites de Júpiter, no pensaba en el problema de la transmisión de la luz, tampoco Bradley, al dedicarse á medir las insignificantes desviaciones de algunas estrellas zenitales, tenía en mientes la importante consecuencia que dedujo de sus observaciones. Proponíase averiguar si estas estrellas tenían una paralaje sensible, es decir, si por la sola circunstancia de la traslación anual de la Tierra, sufren el cambio de posición aparente que indica la geometría y que depende inmediatamente del movimiento de la Tierra y de la distancia de la estrella á nuestro sistema. Aprovechando Bradley la instalación reciente, hecha por Molyneux en el observatorio de Kew, de un excelente instrumento construído por Graham con este objeto especial, observó la estrella *gamma* de la constelación del Dragón durante el mes de diciembre de 1725, y muy en breve reconoció que esta estrella tenía un movimiento hacia el Sur, movimiento cuya explicación no podía atribuir á los errores de los instrumentos ni á la incertidumbre de las observaciones. Además, este movimiento era precisamente en sentido contrario del que habría debido dar la paralaje, y que continuó hasta marzo, en cuyo mes llegó á 20'', cantidad que representaba la distancia á que la estrella se había alejado del polo durante aquellos tres meses. El astro prosiguió entonces su marcha hacia el Norte, y en junio volvió á hallarse en el punto de partida de diciembre. En septiembre estaba 20'' más al Norte, luego volvió al Sur para recobrar por segunda vez en diciembre su posición primitiva. Bradley no pudo explicarse estas oscilaciones, ni apelando á la hipótesis de una nutación del eje de la Tierra, ni á la refracción atmosférica. Por último, ocurriósele la idea de ver si dichos fenómenos tendrían por causa la velocidad con que los rayos de luz llegan hasta el observador, que á su

vez va transportado en el espacio por el globo en que está situado con velocidad mucho menor por cierto que la de los rayos luminosos. Tal es en efecto la verdadera razón del fenómeno descubierto por Bradley, fenómeno que muy luego conoció ser común á todas las estrellas y al que el ilustre astrónomo inglés dió el nombre de *aberración*.

Veamos en efecto lo que sucede cuando un rayo de luz penetra en el tubo del instrumento que sirve para observar la estrella considerada, si se tiene en cuenta á la vez la velocidad de la luz y la de la Tierra.

Sea BT (fig. 423) la posición del eje del antejo en el momento en que el observador contempla el astro. Este eje indica la dirección aparente de los rayos luminosos, de suerte que á la estrella se la ve en *e* en la bóveda celeste. Mientras el rayo luminoso ha recorrido la longitud BT, la Tierra se ha trasladado á su vez de B á C, y con ella el antejo lo propio que el ojo del observador. La verdadera marcha seguida por el rayo es la línea TC, que desde entonces representa en realidad la dirección de los rayos emanados de la estrella. La posición efectiva de ésta en la bóveda celeste es por consiguiente E; allí se vería la estrella si la Tierra estuviese inmóvil. En una palabra, la dirección aparente no es otra cosa sino la de la resultante de los dos movimientos de la

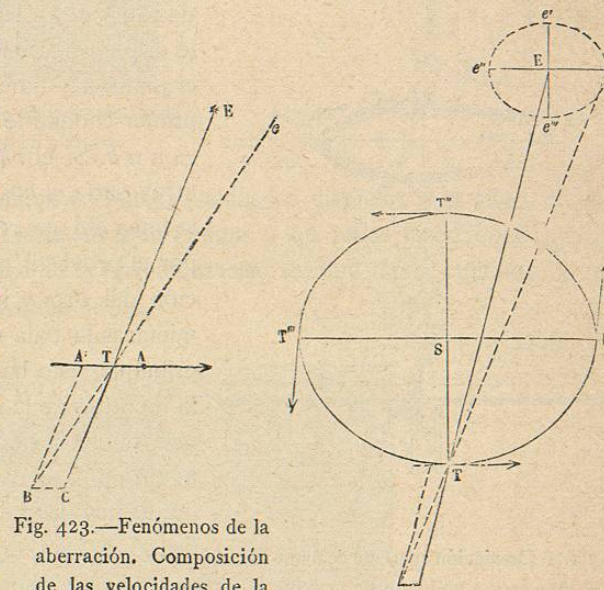


Fig. 423.—Fenómenos de la aberración. Composición de las velocidades de la luz y de la Tierra.

Fig. 424.—Aberración anual

luz por una parte, y de la Tierra por otra; es la diagonal del paralelogramo formado por dos líneas proporcionales á las dos velocidades y trazadas en las direcciones de los dos movimientos. Así pues, las velocidades simultáneas de la luz y de la Tierra deben causar y causar en efecto una desviación en la dirección de los rayos luminosos emanados de un punto que no participa del movimiento de nuestro globo. Esta desviación, ó sea el ángulo  $ETe$ , es la que constituye la aberración hecha evidente por Bradley al observar las estrellas zenitales. La velocidad de la luz es constante; la de la Tierra varía en muy reducidos límites. Los lados BC y CT del triángulo no cambian, pero no sucede lo propio con el ángulo que forman entre sí, á no ser que se considere una estrella situada en el polo de la eclíptica ó á corta distancia de él. En *e* (fig. 424) se verá otra estrella semejante E cuando la Tierra está en T de su órbita, y en *e'*, *e''*, *e'''*, cuando ocupa sucesivamente las posiciones T', T'', T'''. En una palabra, la estrella está siempre más adelante de su posición real del ángulo de aberración, de suerte que en un año parece trazar un círculo paralelo á la órbita terrestre, con la particularidad de que siempre parece 90° adelantada á la Tierra. El ángulo de aberración máximo es algo mayor de 20''. Las últimas mediciones, hechas por Otto Struve, dan 20'',445, de suerte que el diámetro del círculo es de 40'',89. En cuanto á las estrellas situadas fuera