

planeta en una época anterior, dado que la luz ha debido invertir un espacio de tiempo determinado en recorrer la distancia que separa al astro de la Tierra. Durante este tiempo, el planeta, que tiene un movimiento propio, ha cambiado en realidad de lugar en su órbita, y su posición verdadera en el instante físico de la observación no es ya la que el observador anota, aún después de haberla corregido de la aberración. Por lo que respecta á los varios planetas, la diferencia de tiempo de que habla-

mos varía entre límites bastante considerables, pero también varía para un mismo planeta, puesto que en el curso de una de sus revoluciones sinódicas, cambia también de distancia. El cuadro siguiente marca los máximos y mínimos de estas desigualdades, así como el ángulo de aberración de cada planeta, ángulo que varía necesariamente de uno á otro, pues siendo constante la velocidad de la luz, la del astro en su órbita va disminuyendo á medida que se aleja del Sol.

NOMBRES de los planetas	ANGULO de aberración	TIEMPO QUE INVIERTE LA LUZ EN LLEGAR		
		del planeta al sol	del planeta á la tierra	
			1. <sup>o</sup> á la distancia mínimum	2. <sup>o</sup> á la distancia maximum
Mercurio. . . . .	32"	3 <sup>m</sup> 11 <sup>s</sup>	4 <sup>m</sup> 32 <sup>s</sup>	10 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup>
Vénus. . . . .	23"5	5 <sup>m</sup> 57	2 <sup>m</sup> 36	14 <sup>m</sup> 18
La Tierra. . . . .	20"445	8 <sup>m</sup> 15	»	»
Marte. . . . .	14"7	12 <sup>m</sup> 34	3 <sup>m</sup> 5	22 <sup>m</sup> 4
Júpiter. . . . .	8"8	42 <sup>m</sup> 55	34 <sup>m</sup> 15	53 <sup>m</sup> 13
Saturno. . . . .	6"5	1 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> 42	1 <sup>h</sup> 6 <sup>m</sup>	1 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 34
Urano. . . . .	4"5	2 <sup>h</sup> 38 <sup>m</sup> 15	2 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> 40	2 <sup>h</sup> 53 <sup>m</sup> 15
Neptuno. . . . .	3"7	4 <sup>h</sup> 7 <sup>m</sup> 57	3 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 40	4 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> 20

III

MEDICION DIRECTA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ.—MÉTODO DE M. FIZEAU

Los dos métodos anteriormente expuestos conducen tan sólo indirectamente á la solución del problema que tiene por objeto la medición de la velocidad de la luz. La exactitud de la cantidad que resulta valiéndose de uno ú otro de ambos métodos está subordinada al conocimiento de un elemento astronómico, la paralaje del Sol. Era pues importante averiguar por medio de métodos puramente físicos la velocidad de la luz, y comprobar por la comparación de los resultados de tal suerte obtenidos la mayor ó menor exactitud de los datos astronómicos sobre las dimensiones de la órbita terrestre, y por consiguiente sobre las del sistema solar. Dos sabios franceses, los Sres. Fizeau y Leon Foucault, han llegado á este resultado, cada uno por su parte. Describiremos sucesivamente los procedimientos empleados por ambos físicos, los experimentos que han hecho y los resultados que cada cual ha obtenido.

Empecemos por el método de M. Fizeau.

Su principio es el siguiente: Supongamos una pantalla móvil situada delante de un foco luminoso: si se levanta la pantalla, la luz pasa y á bastante distancia va á dar en un espejo plano colocado perpendicularmente á la dirección seguida por el haz luminoso. El espejo refleja este haz que, volviendo sobre sí mismo, recorre de nuevo, pero en sentido inverso, la distancia del espejo al foco. Si durante el espacio de tiempo que la luz ha invertido en franquear la doble distancia, en ir del foco al espejo y de éste á aquél, se ha bajado la pantalla, la luz interceptada no volverá á su punto de partida. La cuestión consiste en saber cuánto tiempo podrá permanecer la pantalla levantada cuando se ha llenado ya la condición de interceptación, tiempo que será precisamente el que emplee la luz en recorrer el doble camino de la pantalla al espejo.

Veamos de qué medio se ha valido M. Fizeau para realizar, para aplicar este principio, tal como lo hemos resumido. El aparato de que ha hecho uso está representado en su parte más esencial en la figura 22. Se compone de dos partes: una, la de la derecha del grabado, esta-

ba situada en Suresnes, punto de partida de los rayos luminosos; otra, la de la izquierda, lo estaba en Montmartre, punto de llegada.

La luz de una lámpara envía un haz de rayos luminosos á un sistema de dos lentes, colocados en un tubo lateral, y dicho haz se refleja en un espejo M, compuesto de un pedazo de cristal sin azogar, inclinado 45° respecto de la dirección de los rayos luminosos. El haz, después de su reflexión, converge en un punto que es precisamente el foco del objetivo de un anteojo

que da paralelismo á los rayos, los cuales recorren la distancia que separa las dos estaciones.

Al llegar á Montmartre, atraviesa el haz el objetivo de otro anteojo, y va á concentrarse en un espejo que lo refleja, según la misma dirección que traía, sobre el primer espejo inclinado, atraviesa el cristal sin azogar, y el observador puede examinarlo provisto de un ocular. Como vemos, por medio de esta disposición, M. Fizeau ha podido observar en Suresnes la imagen de una luz colocada á su lado, después

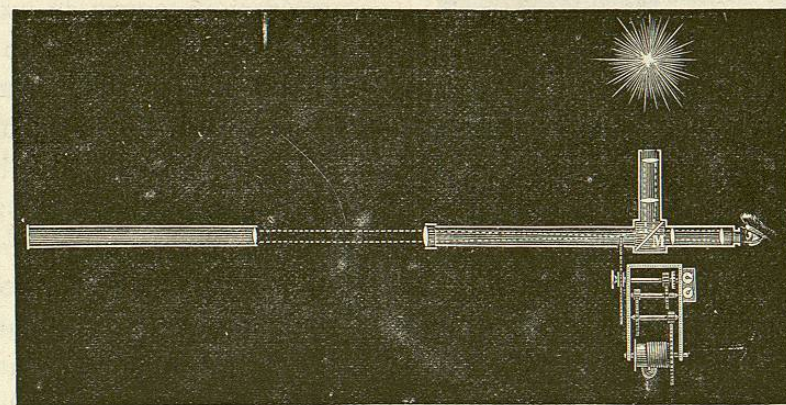


Fig. 22.— Aparato de M. Fizeau para determinar la velocidad de la luz

de haber recorrido sus rayos el doble trayecto que hay desde Suresnes á Montmartre.

Toda la cuestión se reduce á averiguar el tiempo que emplea la luz en franquear este doble intervalo; para conseguirlo, M. Fizeau colocaba en el camino de los rayos, algo hácia adelante del espejo M y en el punto en que los rayos emanados de la lámpara forman su foco, los dientes de una rueda, á la cual un aparato de relojería imprime un movimiento de rotación muy rápido y uniforme.

Siempre que el movimiento de la rueda coloca un diente en el curso del haz, haciendo las veces de una pantalla ú obturador, queda la luz interceptada, al paso que atraviesa libremente el espacio que separa un diente de otro, cuyo efecto total viene á ser como si alternativamente se bajara y levantara una pantalla opaca en el curso del haz luminoso. Supongamos que al principio de la rotación, inmóvil aún la rueda, presenta uno de sus vacíos al paso de la luz; el observador distinguirá la imagen del punto luminoso sin que se amortigüe el brillo de éste; si entonces gira la rueda, pero con tal velocidad que cada diente emplee para venir á ocupar el

sitio del vacío que le sigue mayor espacio de tiempo del que necesita la luz para ir á Montmartre y volver á Suresnes, sucederá que al volver el rayo luminoso hallará todavía libre el camino por el mismo vacío que atravesó en su viaje de ida; el punto luminoso continuará siendo visible, pero á medida que aumenta la velocidad de rotación, disminuye la intensidad de la luz, porque de todos los rayos luminosos que atraviesan cada uno de estos intervalos, hay un número creciente que á su vuelta hallan interceptado el paso. Si, por último, la velocidad de la rueda llega á ser tanta que el tiempo que emplea un diente en venir á ocupar el puesto del vacío que le precede es precisamente igual á que invierte la luz en recorrer la doble distancia que hay entre una y otra estación, no hay un solo rayo de luz que atravesando la rueda á la ida, deje de encontrar cerrado el paso á la vuelta, y por tanto habrá un eclipse continuo del punto luminoso mientras persista la velocidad de que hablamos.

Con esto basta, pues un contador adaptado á la rueda da á conocer el número de vueltas que efectúa por segundo; conócese también el



número de dientes y el de los espacios vacíos, y asimismo conocemos el tiempo que emplea un diente en ocupar el sitio de un vacío (1), que como acabamos de ver es rigurosamente igual al que invierte la luz en recorrer dos veces los 8,633 metros que separan ambas estaciones.

Por este procedimiento halló M. Fizeau que la velocidad de la luz era de 315,000 kilóme-

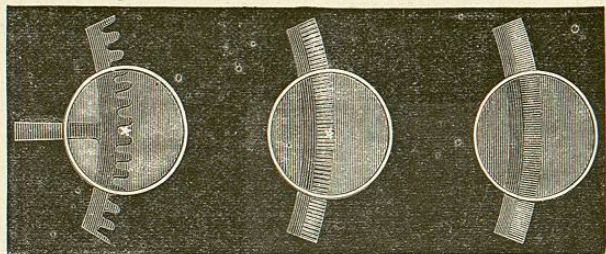


Fig. 23.—Experimentos de M. Fizeau: 1 punto luminoso visto á través de los dientes de la rueda inmóvil; 2 eclipse parcial del punto luminoso; 3 eclipse total.

tros por segundo, número que se aproxima mucho al obtenido de los eclipses de los satélites de Júpiter, cuando se adoptaba la distancia del Sol, deducida de la antigua paralaje de este astro.

M. Fizeau hizo en 1849 los notables experimentos de que acabamos de hacer mencion. En estos últimos años los ha reproducido M. Cornu, uno de los más notables físicos franceses, el cual, sin modificar en nada el método en su principio, lo ha perfeccionado bajo diferentes aspectos. Una de las dificultades del procedimiento empleado por Fizeau consiste en la medición exacta de la velocidad de rotación de la rueda dentada en el momento de la desaparición ó del eclipse del punto luminoso, lo propio que en el de la reaparición; para ob-

(1) El disco empleado por M. Fizeau tenía su contorno dividido en 1,440 partes iguales, cada una de ellas por consiguiente de un cuarto de grado. Estaban vaciadas de dos en dos, de suerte que había en total 720 dientes separados por espacios de la misma anchura que los dientes.

El contador marcó una velocidad de 12,67 vueltas por segundo en el momento del primer eclipse del punto luminoso. Entonces la velocidad de rotación era tal que un diente pasaba á ocupar el puesto del intervalo vacío en un tiempo marcado por la fracción de segundo

$$\frac{1}{1,440 \times 12,67} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{18,244}$$

Así pues, para franquear dos veces el intervalo comprendido entre las dos estaciones (es decir,  $8,633^m \times 2$  ó 17,266 metros), la luz había invertido la  $18,244^a$  parte de un segundo. Luego su velocidad en el aire en un segundo era igual á  $17,266^m \times 18,244$  ó á 315,000 kilómetros. Pronto veremos que este primer resultado era algo excesivo.

viarla se había esforzado en hacer constante, por espacio de un minuto próximamente, la velocidad que correspondía á estos máxima ó mínima de luz.

M. Cornu al hacer sus experimentos, ha preferido dar á la rueda dentada una velocidad creciente ó decreciente según una ley regular, anotando automáticamente la rapidez de este movimiento por medio de una corriente eléctrica; otra corriente le permitía también registrar los momentos precisos de las apariciones ó desapariciones del punto luminoso. En el cilindro con una capa de negro de humo en el cual se traza gráficamente el número de vueltas de la rueda dentada, otra línea marca los puntos *ab* correspondientes á estos momentos, y una tercera registra los segundos 0, 2, 4 de un reloj inmediato (fig. 25). De esta suerte se obtiene la medida de la velocidad de la luz por la coincidencia de estos tres trazados independientes.

De una serie de 698 experimentos hechos en 1873 entre la Escuela politecnica y el monte Valeriano, separados por una distancia de 10,310 metros, dedujo M. Cornu que la velocidad de la luz en el vacío era de 298,500 kilómetros por segundo. En 1875 hizo otros 504 experimentos entre el Observatorio y la torre de Montlhery (distancia 23 kilómetros), los cuales dieron por resultado 300,400 kilómetros. El sabio físico calcula que este valor es exacto con solo 0,001 de diferencia.

#### IV

##### MEDICION DIRECTA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ.— MÉTODO DEL ESPEJO GIRATORIO DE FOUCAULT

Leon Foucault hizo de 1850 á 1862 muchos experimentos que le permitieron determinar directamente la velocidad de la luz. La cifra que obtuvo por resultado no difiere notablemente de la deducida por Fizeau. Procuremos dar una idea del medio de que se valió.

Acababa Wheatstone de averiguar cuál podría ser el límite mínimo de la velocidad de la electricidad por el método de los espejos giratorios, y Arago concibió la idea de valerse de este método, convenientemente modificado, no para medir la velocidad absoluta de la luz, sino para compararla en el agua y en el aire. Esta comparación era de gran importancia, bajo el

punto de vista de las dos teorías de la luz que por aquel entonces tenían divididos á los hombres de ciencia. En efecto, según la teoría de Newton ó de la *emision*, la luz debía propagarse más rápidamente en el agua que en el aire, debiendo suceder lo contrario si la teoría de las *ondulaciones* era la verdadera.

Para decidir entre ambas hipótesis era menester averiguar prácticamente cuál de las dos velocidades aventajaba á la otra. Arago planteó el principio del método que se debería emplear, describió los aparatos propios para ponerlo por obra y hasta encargó al hábil mecánico Breguet la construcción de estos aparatos. Pero el ilustre secretario de la Academia de ciencias no pudo realizar su proyecto á causa de la cortadad de su vista, y entonces Fizeau y Leon Foucault, autorizados por Arago para poner en ejecución sus propósitos, lograron casi al mismo tiempo el resultado apetecido, si bien modificando cada cual por su parte la disposición de los instrumentos, y vieron que la luz se mueve con más rapidez en el aire que en el agua, lo cual era una nueva confirmación de la verdad de la teoría de las ondas.

Este primer resultado era importantísimo bajo el punto de vista de la teoría; pero todavía no marcaba numéricamente el valor de la velocidad absoluta de la luz.

Véase cómo resolvió Leon Foucault esta segunda parte del problema. Copiamos de su Memoria la descripción del aparato motor de que hizo uso, y la de los medios de que se valió para que un espejo, base de su experimento, tuviera una velocidad constante, así como para medirla.

«Digamos ante todo cómo se imprime al espejo una velocidad constante.

«Este espejo, de cristal azogado M, y de 14 milímetros de diámetro, está montado directamente sobre el eje AA de una pequeña turbina de aire (fig. 26), admirablemente construida por M. Froment; el aire lo suministra un fuelle de alta presión de M. Cavaillé-Coll, quien ha adquirido justo renombre como fabricante de órganos; y siendo esencial que la presión tenga una gran fijeza, al salir el aire del fuelle atraviesa un regulador ideado por M. Cavaillé y en el cual la presión no varía de  $\frac{1}{8}$  de milímetro por  $0^m.30$  de columna de agua. Así pues, al

salir el aire por los orificios de la turbina representa una fuerza motriz notablemente constante, y por otro lado, al adquirir el espejo mayor rapidez no tarda en encontrar en el aire ambiente una resistencia que, para una veloci-

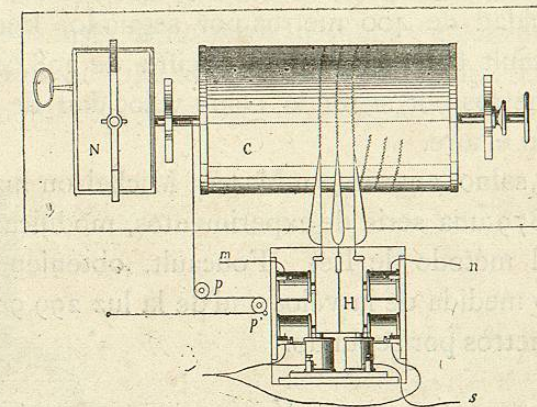


Fig. 24.—Aparato anotador de M. Cornu. Experimentos sobre la velocidad de la luz: C, cilindro anotador; H, carrito que lleva tres electro-impulsos provistos de sus punzones; N, motor Foucault con muelle, que comunica el movimiento al anotador.

dad dada, es también perfectamente constante. El móvil, situado entre dos fuerzas contrarias que propenden á equilibrarse, no puede dejar de adquirir y conservar una velocidad uniforme.

»Restaba contar el número de vueltas, ó mejor dicho, imprimir á este móvil una veloci-

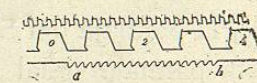


Fig. 25.—Diagrama del aparato anotador

dad determinada. Este problema ha sido completamente resuelto del modo siguiente:

»Entre el microscopio y la luna de reflexión parcial hay un disco circular cuyo borde, finalmente dentado, intercepta en parte la imagen que se observa; el disco gira sobre sí mismo de un modo uniforme, de suerte que si la imagen brillase sin intermision, no se verían los dientes del borde del disco á causa de la uniformidad del movimiento; pero la imagen no es permanente, sino que resulta de una serie de apariciones discontinuas cuyo número es igual al de las revoluciones del espejo; y en el caso particular de que los dientes de la pantalla se sucedan también en el mismo número, la vista padece una ilusión fácil de explicar y que hace aparecer la denticulación como si el disco no diese vueltas. Supongamos que este disco tiene *n* dientes en su circunferencia, que da una vuelta por segundo y que se pone en marcha