

del polo de la eclíptica, resulta que describen anualmente elipses cuyo eje mayor, paralelo á la eclíptica, tiene también $40''{,}89$, y el menor disminuye con la latitud de la estrella. Estas elipses se reducen en el plano de la eclíptica á líneas rectas, y cuando la Tierra está en uno ú otro extremo del diámetro que va á parar á la estrella, el ángulo de aberración es nulo, lo cual se comprende, porque entonces la dirección del movimiento de la Tierra es precisamente opuesta á la de los rayos luminosos, ó bien coincide con ella.

Para que se comprenda bien el fenómeno de la aberración de la luz y su causa, vamos á demostrar la analogía que hay entre él y los hechos que pueden observarse fácilmente en la superficie de la Tierra.

Consideremos un barco que navegue en la dirección AB con determinada velocidad (fig. 425). Una batería situada en la costa

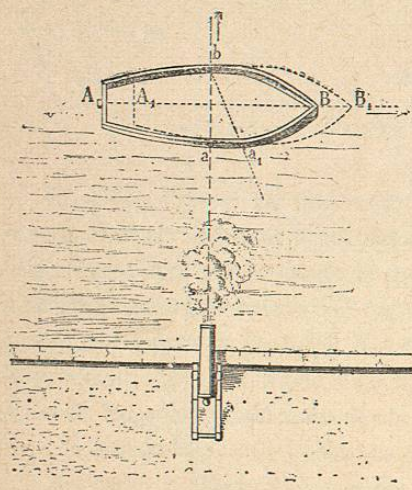


Fig. 425.—Desviación aparente de un proyectil que toca á un buque en marcha

le dispara una bala que va á dar en su casco en el punto a y que prosigue su marcha sin que el primer choque le haya hecho cambiar su dirección $a b$. Si el barco estuviese inmóvil, la bala atravesaría el costado opuesto por el punto b , y la línea $a b$ que reuniría los dos agujeros abiertos por el proyectil marcaría precisamente la dirección del tiro y la de la boca de fuego; pero mientras la bala recorre la línea $a b$ ó atraviesa el buque, éste ha avanzado de $A B$ á $A_1 B_1$; en la hipótesis de la inmovilidad del barco, el punto que hubiera sido atravesado por la bala ha avanzado á b' y ésta abre el costado por un punto que dista del primero $b b'$. En lugar de la dirección $b a$ que es la verdadera, el observador situado en el buque juzgará de la dirección del tiro por la línea $b' a$ y le parecerá que la bala

procede del punto c . La desviación $a b' a$, tiene por causa la combinación de las velocidades del proyectil y del barco: es un efecto de la aberración. Si la bala hubiese llegado por la proa ó por la popa de la embarcación, en la dirección misma de su marcha, la desviación sería nula á no dudarlo.

Desde un tren en marcha podemos observar un fenómeno parecido cuando examinamos las gotas de lluvia. Supongamos, para mayor sencillez, que la lluvia cae verticalmente: si el vagón está parado, el viajero verá cómo caen las gotas en una dirección paralela á la de los bordes de la ventanilla, como así es en efecto. Mas tan luego como el tren echa á andar, la apariencia cambia; parece que la lluvia cae oblicuamente, como si la empujase un viento procedente del punto del horizonte hacia el cual marcha el tren, y la oblicuidad de las gotas será tanto mayor cuanto más de prisa corra el tren. Fácilmente se comprende que una gota a que habría caído siguiendo la línea $a b$, paralela al lado de la portezuela, caiga en efecto en el espacio siguiendo dicha línea; pero, al llegar á la parte inferior de su carrera, el vagón y la portezuela han avanzado de A á B y la gota cae en el punto b de esta última, de suerte que al viajero le ha parecido que seguía la línea $a' b$.

Un transeunte que estuviese parado resguardándose con su paraguas de la lluvia que cae verticalmente, no recibiría una sola gota; pero si anda algo de prisa en cual-

quier dirección, se mojará y creará recibir la lluvia oblicuamente, en sentido opuesto al de la dirección que sigue. Si se supone que recorre así toda una circunferencia de círculo, la lluvia le azotará el rostro como si cayera sucesivamente de todos los puntos del horizonte. Este es un fenómeno análogo por todos conceptos al de la aberración de la luz, y cuyas máxima y mínima variarían del propio modo si se supiera que la lluvia, en

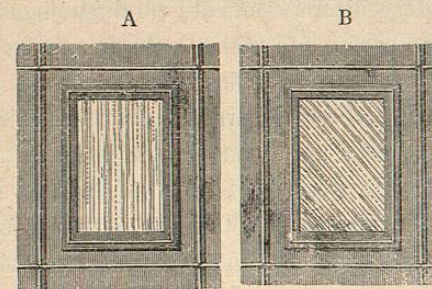


Fig. 426.—Desviación aparente de las gotas de lluvia A, vagón inmóvil; B, vagón en marcha

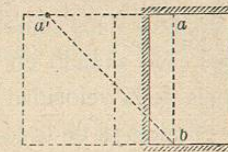


Fig. 427.—Desviación aparente de las gotas de lluvia: explicación

lugar de caer verticalmente, tomaba en realidad todas las direcciones posibles de oblicuidad al horizonte. La Tierra recibe en todo tiempo y en todas direcciones rayos de luz emanados de todos los puntos de la bóveda celeste: es una lluvia continua de moléculas, ó si se prefiere, de ondas luminosas.

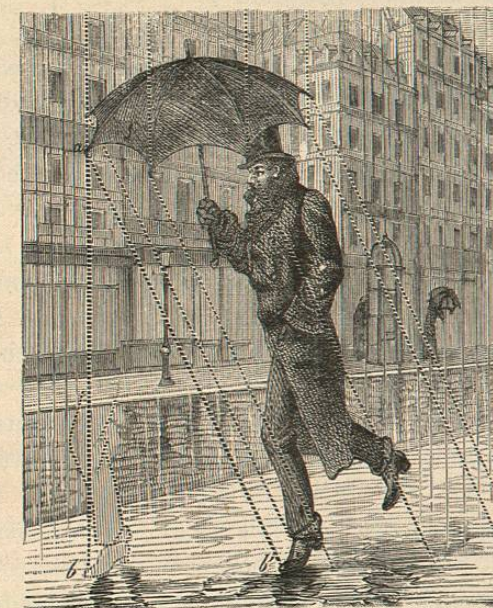


Fig. 428.—Fenómeno análogo á la aberración

La aberración es un fenómeno común á todos los astros, lo mismo al Sol que á las estrellas y planetas. Así pues, para conocer la posición verdadera de estos cuerpos deben tener en cuenta los astrónomos, entre otras correcciones, las alteraciones que resultan para las coordenadas á las cuales suelen referir dichas posiciones, ascensiones rectas y declinaciones, longitudes y latitudes.

Puesto que la aberración depende á la vez de la velocidad de la luz y de la del observador, es decir, del globo en que éste se halla, resulta de aquí que, además de la abe-

rración relativa al movimiento de traslación de la Tierra, hay también una desviación análoga debida al movimiento de rotación. Pero este movimiento es mucho menos rápido que el primero, puesto que en el ecuador, en que su velocidad llega al máximo, no excede ni siquiera llega á 500 metros por segundo, esto es, apenas equivale á la 650,000.^a parte de la velocidad de la luz.

Por último, hay otra causa que debe intervenir forzosamente en el fenómeno de la aberración para modificar su valor, y que no parece despreciable. Al discutir los astrónomos el conjunto de los movimientos propios de las estrellas, han reconocido que el sistema solar entero avanza por el espacio, y que el Sol, arrastrando consigo los planetas, sus satélites y los cometas del sistema, tiene un movimiento de progresión hacia un punto del cielo situado en la constelación de Hércules. Siendo así, la Tierra debe tener, además de la velocidad de sus dos movimientos de rotación y de traslación, otro de avance paralelo al de todo el sistema (1). Por consiguiente se averiguará cuál es el movimiento absoluto de un observador situado en su superficie buscando la resultante de estos tres movimientos. La aberración de una estrella, tal cual ha sido calculada teniendo en cuenta solamente los dos primeros (ó mejor dicho, tan sólo el movimiento de traslación, por hacerse poco aprecio del de rotación), debe variar en las diferentes épocas del año; las máxima ó mínima de estas variaciones dependerán de la situación de las estrellas y de las direcciones relativas del movimiento de la Tierra en su órbita y del de traslación del sistema solar. Falta saber si la observación confirma estas consideraciones teóricas, cuya exactitud es evidente.

Hemos visto que el método empleado por Røemer para medir la velocidad de la luz no la da en su magnitud absoluta, sino que tan sólo permite calcular el tiempo que invierte una onda luminosa en atravesar el radio de la órbita de la Tierra. Para deducir el camino recorrido en un segundo, es preciso conocer este radio y haber medido la distancia de la Tierra al Sol, ó si se quiere, conocer la paralaje de este último astro. En tiempo de Røemer no se había medido este elemento, por lo menos con alguna precisión; lo ha sido después, siquiera subsistan algunas incertidumbres sobre las últimas cifras que lo representan. Pero lo que sí se ha podido calcular es la relación de la velocidad de la luz con la de la Tierra, habiéndose visto que la primera es igual á 10,190 veces la segunda.

La medida del ángulo de aberración conduce también fácilmente al cálculo de la misma relación, y adoptando las cifras deducidas por Otto Struve, resulta que la velocidad de la luz es igual á 10,100 veces la de la Tierra.

En ciertas ocasiones se confunde con la aberración un fenómeno de desviación distinto de ella, por cuanto proviene, no del movimiento del observador, sino, por el contrario, del del astro observado y de su distancia, al paso que la aberración es independiente de la distancia del astro del que emana la luz. Véase cuál es dicho fenómeno:

Consideremos un planeta. En el momento en que el astrónomo lo ve en el foco de su anteojo, nota una posición aparente que debe corregirse de la aberración para conocer la posición verdadera, ó con más exactitud, para tener la dirección verdadera del rayo luminoso emanado de él. Pero este rayo ha salido del planeta en una época ante-

(1) Según las investigaciones de M. Struve, la velocidad de traslación del sistema solar en dirección de la constelación de Hércules es igual á unos 7,6 kilómetros por segundo. Es la cuarta parte de la velocidad media de la Tierra alrededor del Sol, y por consiguiente la 40,000.^a de la velocidad de la luz.

rior, 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, aun después de haberla corregido de la aberración. Por lo que respecta á los varios planetas, la diferencia de tiempo de que hablamos varía entre límites bastante considerables, pero también varía para un mismo planeta, puesto que en el curso de una de sus revoluciones sinódicas cambia continuamente de distancia. El cuadro siguiente marca las máxima y mínima 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.º á la distancia mínimum	2.º á la distancia máximum
Mercurio.	32''	3 ^m 11 ^s	4 ^m 32 ^s	10 ^m 18 ^s
Venus.	23''5	5 ^m 57	2 ^m 36	14 ^m 18
La Tierra.	20'445	8 ^m 15	"	"
Marte.	14''7	12 ^m 34	3 ^m 5	22 ^m 4
Júpiter.	8''8	42 ^m 55	34 ^m 15	53 ^m 13
Saturno.	6''5	1 ^h 18 ^m 42	1 ^h 6 ^m	1 ^h 31 ^m 34
Urano.	4''5	2 ^h 38 ^m 15	2 ^h 22 ^m 40	2 ^h 53 ^m 15
Neptuno.	3''7	4 ^h 7 ^m 57	3 ^h 57 ^m 40	4 ^h 22 ^m 20

III

MEDICIÓN 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 León 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 movable 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 429. Se compone de dos partes: una, la de la derecha del grabado, estaba 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 lumino-

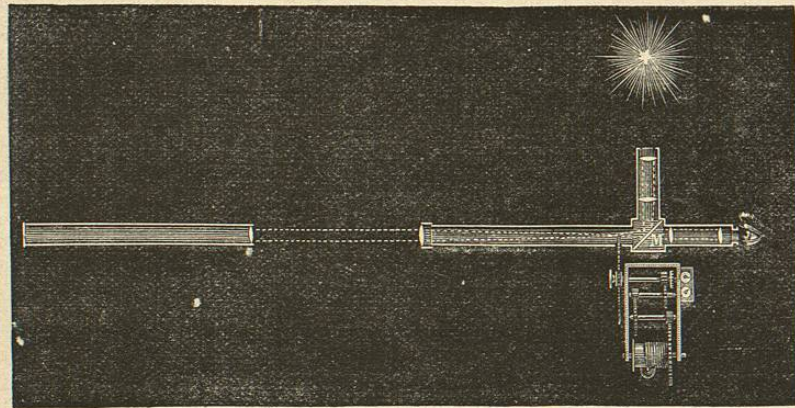


Fig. 429.—Aparato de M. Fizeau para determinar la velocidad de la luz

sos. 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, en 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 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 hacia 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, pre-

senta uno de sus huecos 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 hueco 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 hueco 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 hueco que le precede es precisamente igual al 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.

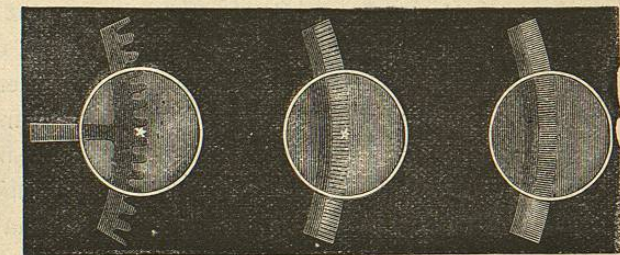


Fig. 430.—Experimentos de M. Fizeau: 1, punto luminoso visto á través de los dientes de la rueda inmóvil; 2, eclipse parcial del punto luminoso; 3, eclipse total.

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 huecos, y asimismo conocemos el tiempo que emplea un diente en ocupar el sitio de un hueco (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 kilómetros 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 mención. 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 perfeccio-

(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.

nado 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 obviarla se había esforzado en hacer constante, por espacio

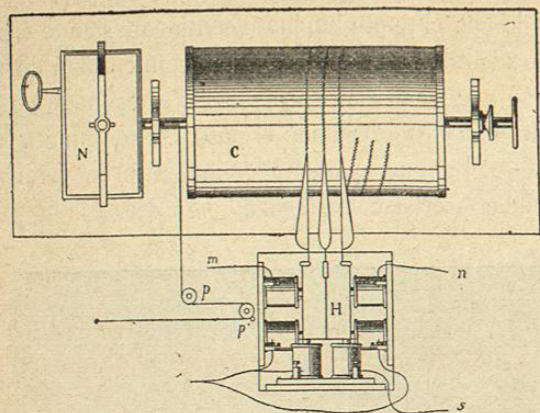


Fig. 431.—Aparato anotador de M. Cornu. Experimentos sobre la velocidad de la luz: C, cilindro anotador; H, carrito que lleva tres electro-imanes provistos de sus punzones; N, motor Foucault con muelle, que comunica el movimiento al anotador.

de un minuto próximamente, la velocidad que correspondía á estas 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 *a b* correspondientes á estos momentos, y una tercera registra los segundos 0, 2, 4 de un reloj inmediato (fig. 432). 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 politécnica 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 sólo 0,001 de diferencia.

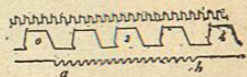


Fig. 432.—Diagrama del aparato anotador

IV

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

León 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 *emisión*, 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 cortedad de su vista, y entonces Fizeau y León Foucault, autorizados por Arago para poner en ejecución sus propósitos, lograron casi al mismo tiempo el resultado apetecido, si bien mo-

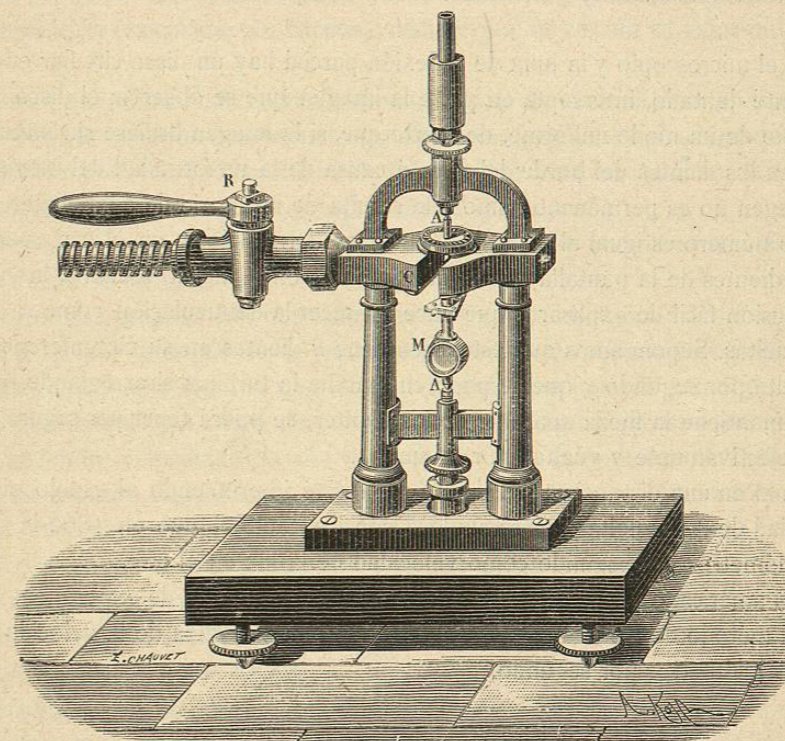


Fig. 433.—Turbina que imprime el movimiento al espejo

dificando 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 León 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 M, de cristal azogado y de 14 milímetros de diámetro, está montado directamente sobre el eje AA de una pequeña turbina de aire (fig. 433), admirablemente construída por M. Froment; el aire lo suministra un fuelle de alta presión de M. Cavallé-Coll, quien ha adquirido justo renombre como fabricante de órganos; y