

duciendo un desvío perceptible de la sombra, al punto se notaba la imagen de los brazos ó del cuerpo.,,

Con los anteojos de gran amplificación se ve cómo se desvían rápidamente las estrellas en virtud del movimiento diurno, observación que puede hacerse tanto de día como de noche, procediendo principalmente esta visibilidad en pleno día de que subsiste la intensidad del punto luminoso, sea cualquiera la amplificación, al paso que el campo del antejo en que dicho punto se proyecta se oscurece á causa de esta misma am-

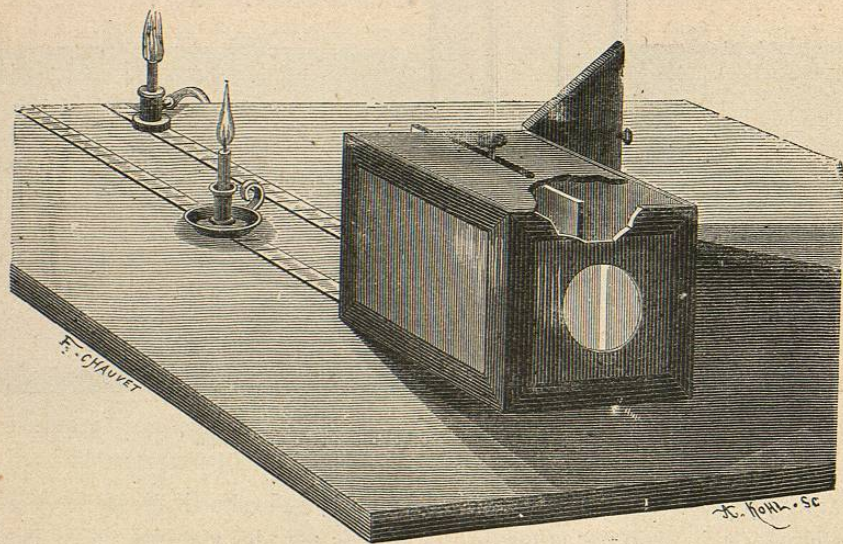


Fig. 585.—Fotómetro de León Foucault

plificación. Arago creía que la movilidad de la estrella en el campo visual debía contribuir á esta visibilidad, pero Bessel no admitía semejante influencia.

Bouguer y Wollaston han tratado cada uno de por sí de comparar la luz del Sol con la de la Luna llena, tomando por término de comparación la luz de una bujía, y ambos han deducido que la luz del Sol equivale á las luces reunidas de unas 5,600 velas situadas á 30 centímetros de distancia. La de la Luna es, según Wollaston, igual á la 144.^a parte de la de una vela colocada á 3^m,65, de lo cual ha deducido, en virtud de un cálculo fácil, que la luz del Sol viene á ser igual á 800,000 veces la de la Luna llena, cifra que sólo llega á 300,000 en concepto de Bouguer. Arago añade refiriéndose á la cantidad deducida por Wollaston y que difiere tanto de la del físico francés: "No puedo decir en qué consiste la enormidad de este número comparado con el de Bouguer, porque el método empleado era exacto y la observación de incontestable habilidad.,, ¿Qué deberemos deducir de esto sino que hay que estudiar de nuevo el problema?

CAPITULO XVII

EL OJO Y LA VISIÓN

I

DESCRIPCIÓN DEL ÓRGANO DE LA VISTA EN EL HOMBRE

Todos los numerosos y variados fenómenos que acabamos de describir se refieren á la propagación de la luz por diferentes medios y á las modificaciones que sufre, ya por lo que á su intensidad se refiere ó ya por lo que respecta al color, cuando se cambian las condiciones del curso seguido por los rayos luminosos. Hasta aquí apenas hemos tenido en cuenta el modo cómo afectan á nuestros órganos todos estos fenómenos, ni la marcha que la luz sigue cuando cesa de pertenecer, por decirlo así, al mundo exterior para convertirse en fenómeno interno.

¿Cómo se efectúa este paso? ¿Qué transformación media para que un movimiento vibratorio, como el de las ondas del éter, llegue á producir la sensación de la vista en el hombre y en los animales? ¿En qué consiste que ciertas variaciones en la amplitud ó velocidad de las vibraciones originen cambios correspondientes en la intensidad de la luz y en los colores de los cuerpos? Cuestiones son estas no resueltas en su totalidad por la ciencia, y que más bien pertenecen al dominio de la fisiología que al de la física.

Lo que se sabe, lo que la observación ha permitido estudiar de un modo positivo, es la marcha de los rayos luminosos en el ojo, desde el momento en que penetran en este órgano hasta el en que, llegando á los nervios, se transmite al cerebro la impresión que producen, determinando en él la sensación de la vista. En este trayecto, los rayos luminosos obedecen á las conocidas leyes de la propagación de la luz en medios de forma y densidad variables; en este asunto sólo se trata de fenómenos de simple refracción.

El ojo no es ni más ni menos que una cámara oscura, cuyo orificio lleva en su parte anterior un vidrio transparente y en la posterior una lente, y cuyo fondo está cubierto por una membrana que sirve de pantalla en la cual se estampan, pero al revés, las imágenes de los objetos externos. Describamos algo detalladamente este admirable órgano.

El ojo humano está, como es sabido, encajado en una cavidad del cráneo llamada *órbita*; su forma es la de un globo casi esférico, rodeado completamente por una membrana dura y consistente que por su semejanza con el cuerno ha recibido el nombre de *córnea*. La *córnea* se divide en dos segmentos de desigual extensión: el más pequeño A, colocado en la parte anterior del ojo, es de curvatura mucho más marcada que el segmento posterior; parece un cristal de reloj que forma cuerpo con el globo del ojo: además es perfectamente transparente é incoloro, al paso que el otro segmento H es opaco y de color blanco-azulado. Se los distingue con los nombres de *córnea transparente* y *córnea opaca*, constituyendo esta última, que no es transparente, sino tan sólo diáfana para las luces de gran intensidad, lo que vulgarmente se llama el *blanco del ojo*.

Al través de la córnea transparente se ve una membrana circular, cuyo color varía según las personas ó las razas, siendo gris, azul claro ú obscuro, ó pardo-amarillento. Esta membrana D es el *iris*, especie de diafragma que tiene en su centro un orificio circular también, en el hombre al menos, y á cuya abertura se da el nombre de *pupila*. Detrás de la pupila, que desempeña las veces del orificio de la cámara obscura, por la cual penetra en el ojo la luz exterior, hay una lente sólida E que es el *cristalino*, cuya cara anterior presenta una curva menos pronunciada que la superficie interna. El cristalino divide la cavidad del ojo en dos partes ó cámaras de dimensiones muy desiguales: la anterior B, comprendida entre la córnea transparente y el cristalino, está llena de un líquido muy parecido al agua pura y dotado poco más ó menos de igual poder refringente

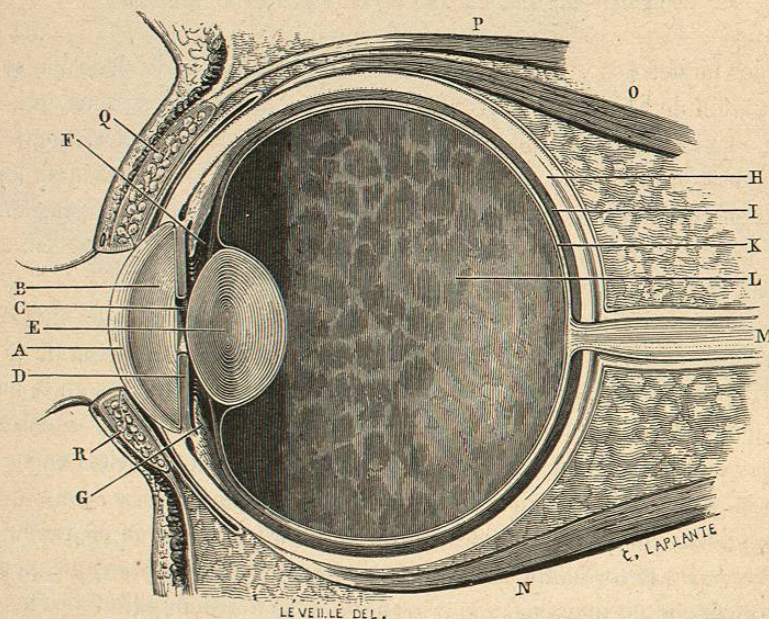


Fig. 586.—Sección diametral antero-posterior del ojo humano

que ésta, líquido llamado *humor acuoso*. Entre el cristalino y el fondo del ojo se encuentra la cámara posterior, llena por completo de una substancia transparente, incolora, de consistencia gelatinosa y algo más refringente que el agua; es el *humor vítreo* L.

Así pues, al penetrar un rayo de luz en el ojo, atraviesa la serie de medios refringentes que vamos á enumerar, antes de llegar al fondo del órgano: la córnea transparente, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo. En cada uno de estos medios sufre una refracción particular, siendo tal el conjunto de sus desviaciones, que su foco va á formarse en la membrana que reviste la cámara posterior del ojo.

Conviene decir aquí que toda la superficie interna de la córnea opaca ó *esclerótica*, como se dice en anatomía, está cubierta por una membrana delgada, la *coroides* I, cuya parte cóncava está tapizada de un pigmento negro propio para absorber la luz (1).

Todas las partes del ojo que acabamos de describir son las que contribuyen á la formación de las imágenes de los objetos, siendo sus funciones, por decirlo así, pasivas.

(1) Este mismo pigmento que tapiza el iris, y cuyo espesor varía, es el que produce el color más ó menos obscuro de los ojos. Cuando la capa de pigmento es muy delgada los ojos son azules ó garzos; cuando es más gruesa da lugar á un color más obscuro, y cuando falta dicho pigmento resulta la particularidad que ha hecho designar á los individuos que carecen de él con el nombre de *albinos*.

En el punto mismo en que se producen estas imágenes tiene efecto la impresión de la luz sobre la parte sensible del ojo. Veamos cuál es la disposición de esta parte que tan importante papel desempeña en el fenómeno de la visión. Detrás del globo del ojo, la coroides y la córnea opaca tienen un agujero circular por el cual pasa el haz de nervios ópticos. Al llegar este haz M al interior del ojo, se dilata y extiende por toda la superficie de la coroides, formando una membrana que está en contacto directo con el humor vítreo, y que es la *retina* K, pantalla sensible de la cámara obscura del ojo.

A corta distancia del punto de inserción de los nervios ópticos hay en la retina una mancha de color amarillento (*macula lútea*) que tiene gran importancia en la visión, por cuanto en ella es donde se forma siempre la imagen del punto ú objeto en el cual fijamos la vista: es el sitio de la visión más distinta. El ojo del hombre y el del mono son los únicos cuya retina tiene esta mancha amarilla. Las partes contiguas á la retina están dotadas de menos sensibilidad, y sobre todo no gozan en el mismo grado que la mancha amarilla de la facultad de distinguir dos impresiones producidas en puntos muy inmediatos. Hay además otro punto en que esta sensibilidad desaparece por completo: y en efecto, toda la parte del fondo del ojo que corresponde á la entrada del nervio óptico es insensible á la luz. Esta parte es lo que se llama *punto ciego* ó *punctum caecum*, demostrándose por medio de experimentos muy sencillos la existencia de esta región de insensibilidad de la retina.

Uno de ellos se debe al físico Mariotte, y consiste en marcar en un plano vertical, por ejemplo en una pared, una serie de puntos trazados á igual distancia unos de otros. Si el observador se sitúa enfrente de la línea de puntos y contempla uno de ellos cerrando el ojo izquierdo, ve claramente el punto que mira, pero los demás confusamente.

Separándose entonces de la pared, sin apartar la vista del primer punto, llega un momento en que el segundo es invisible, pero á distancia algo mayor aparece de nuevo. En seguida sucede otro tanto con el tercer punto, luego con el cuarto, y así sucesivamente con toda la serie. La desaparición de cada punto se efectúa siempre en el momento en que la distancia del ojo á la pared es casi triple (para ciertas vistas cuadruple) de la que media entre el punto que desaparece el primero de la serie y el que se mira con el ojo derecho. Mirando con el izquierdo, sería preciso contemplar el último punto de la derecha. Este mismo experimento puede hacerse de otro modo, limitándose á trazar dos puntos ó círculos.

Trázanse sobre fondo negro dos circulitos blancos ó un círculo y una cruz, separados unos ó centímetros. Se cierra un ojo, por ejemplo el izquierdo, y con el derecho se mira la cruz con toda fijeza. El observador se aparta ó se retira en seguida poco á poco hasta que la distancia del ojo derecho á la cruz sea un poco más de cuatro veces mayor que el intervalo que media entre ésta y el círculo blanco. En tal momento este círculo desaparece, y el fondo negro parece continuo. Para que la prueba salga bien es preciso mirar con toda fijeza la cruz blanca (1).

(1) Helmholtz describe como sigue un procedimiento merced al cual cualquiera puede determinar fácilmente la forma y las dimensiones aparentes del *punctum caecum*: "Se da al ojo, dice, una posición fija, á 8 ó 12 pulgadas de una hoja de papel blanco, en la cual se haya trazado una crucecita que sirva de punto de mira. Luego se hace correr sobre el papel, en la proyección del *punctum caecum*, la punta mojada de tinta de una pluma blanca ó al menos poco obscura; esta punta desaparece de la vista; alejando la pluma sucesivamente, en distintas direcciones, se marca cada vez el punto en que empieza á ser visible. Para designar el tamaño aparente que la mancha ciega ocupa en el campo visual, diremos que podrían ponerse en fila once lunas llenas sin traspasar su diámetro, y que á seis ó siete pies de distancia puede desaparecer en él por completo una figura humana. (*Optica fisiológica.*)

Es fácil de comprender la marcha de los rayos de luz que emanan de un objeto AB, y de qué manera va este objeto á formar su imagen en la retina. El sistema lenticular compuesto de la córnea transparente y del cristalino, separados por el humor acuoso, tiene por centro óptico un punto O, situado algo hacia atrás del cristalino (fig. 587). Si se trazan los ejes secundarios AO, BO, los haces emanados de los puntos A y B convergen en su prolongación y en el punto en que encuentran la retina, y los puntos intermedios forman sus imágenes entre los puntos *a* y *b*; por lo tanto, la imagen del objeto *b a* será invertida. Este resultado es una consecuencia de las leyes de la refracción y de la marcha de los rayos en las lentes; pero también se ha podido comprobar el hecho por la observación directa: tomando el ojo de un animal recién muerto, y quitándole las capas de grasa que envuelven exteriormente el globo, puede adelgazarse la córnea opaca por su parte posterior hasta que queda translúcida; preparado el ojo de esta suerte y expuesto á la luz del día, deja ver por transparencia la imagen reducida

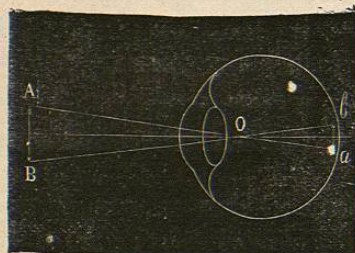


Fig. 587.—Formación de las imágenes en un ojo normal

y muy clara de los objetos externos; también se puede ver la imagen invertida de una bujía al través de la córnea de los animales albinos, córnea que es naturalmente translúcida por la falta de pigmento colorante.

Hemos dicho que el iris desempeña las funciones de un diafragma que no deja penetrar en el ojo sino los conos de luz que tienen por base la abertura de la pupila; pero el iris se puede contraer ó dilatar espontáneamente, por manera que la pupila se reduce ó se agranda. Este movimiento auto-

mático se produce en el primer sentido cuando crece el resplandor de la luz que recibe el ojo, y se efectúa en sentido contrario cuando este resplandor mengua. Lo mismo sucede cuando el ojo contempla objetos situados á varias distancias; la pupila se dilata cuando se miran los lejanos, y se contrae cuando la vista se fija en los próximos. Esto puede comprobarse con un espejo que se tiene en la mano y en el cual se fija la mirada; á cierta distancia se examina el diámetro de la pupila, y aproximando luego rápidamente el espejo sin dejar de mirar la pupila, se observa que ésta se contrae con lentitud.

Asimilado el ojo á un sistema de lentes, puede parecer raro que sirva para ver con claridad tal profusión de objetos situados á distancias tan variables. Es indudable que, para que la visión sea distinta, la imagen del objeto ha de pintarse con claridad en la misma retina, y por consiguiente es preciso que al cambiar la distancia pueda cambiar asimismo el foco, de manera que coincida siempre con la superficie de la membrana nerviosa. En efecto, si se pinta la imagen distinta de un punto luminoso, ya sea delante ó ya detrás de la retina, sucede lo mismo que se observa con una lente convergente cuando se recibe la imagen delante ó detrás del foco correspondiente, esto es, que en lugar de un punto claro y definido se ve un círculo difuso. De aquí resulta "que no podemos ver distintamente y á la vez varios objetos situados á diferentes distancias del ojo.", Para convencerse de ello, dice Helmholtz, basta poner á unas seis pulgadas del ojo un velo ó cualquier otro tejido transparente, y más lejos, como á dos pies de distancia, un libro. Cerrando un ojo para simplificar el experimento, es fácil cerciorarse de que se puede mirar como se quiera, ya los hilos del velo ó ya las letras del libro, y verlas claramente, pero también se nota que las letras se tornan confusas cuando se mi-

ran los hilos del velo, y que si se contemplan aquéllas, el velo aparece como un oscurecimiento ligero y uniforme del campo visual. Si sin cambiar la dirección de la vista se examina, ora el objeto próximo, ora el más apartado, nótase que á cada una de estas alternativas el ojo hace un esfuerzo para efectuar el cambio., (*Optica fisiológica.*)

Este hecho se expresa diciendo que el ojo se acomoda á las distancias; pero ¿por medio de qué mecanismo conserva el ojo de tal suerte su propiedad de percibir distintamente los objetos? En una palabra, ¿cómo se hace la *acomodación*? Para las distancias cortas, por la contracción de la pupila, y para las grandes, por un cambio en la forma del cristalino que disminuye su poder convergente; tales son los dos movimientos sometidos á nuestra voluntad, pero que también se efectúan sin que tengamos conciencia de ello, y con cuyo auxilio explican los físicos la adaptación de que hablamos.

Hay un límite inferior para la distancia de los objetos que procuramos ver distintamente; este límite es el de la *visión distinta* ó *punctum proximum*, que varía según

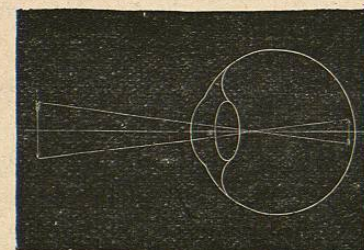


Fig. 588.—Formación de la imagen en el ojo de un presbite

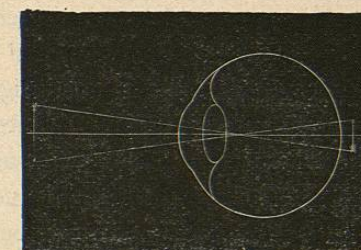


Fig. 589.—Formación de la imagen en el ojo de un miope

las edades entre 15 y 20 centímetros. El punto más remoto (*punctum remotum* ó más bien *remotissimum*) es infinito para ciertas vistas; mas con otras no sucede así, y se ha de apelar á los anteojos de larga vista para ver objetos algo distantes.

Cuando los músculos del ojo se hallan en estado de reposo, ó si se quiere, cuando no hacen ningún esfuerzo de acomodación, la visión distinta es la que corresponde al *punctum remotum*; los ojos para los cuales este punto no tiene límites son los *normales* ó *emetropos* (1).

Los ojos para los cuales el *punctum remotum* no se halla á distancia infinita, no pueden acomodarse á contemplar objetos cuya distancia es mayor que la de dicho punto, y se les da el nombre de *braquimetros* ó *miopes*. No pueden reunir en la retina sino los rayos luminosos que son divergentes en su punto de incidencia.

Dase además el nombre de *hipermetropos* á los ojos cuya distancia focal es mayor que la del cristalino á la retina, de suerte que, sin hacer un esfuerzo fatigoso de acomodación, no pueden ver distintamente ni aun los objetos más apartados, ni los perciben con claridad á cualquier distancia que sea.

Por último, la conformación del ojo puede ser tal que el límite de la visión directa supere al de que hemos hablado antes. Esta afección, que se nota más especialmente en las personas de edad, las obliga á separar á bastante distancia el libro que quieren leer para poder hacerlo sin confundir las letras; lo cual depende de que la imagen va á formarse más allá de la retina (fig. 588), de suerte que la convergencia de los rayos

(1) De *emmetros*, en la medida, y *ops*, ojo. Aquí se trata solamente de la *visión distinta*; pues puede haber ojos *emetropos* que tengan defectos por otros conceptos.

emanados de un punto luminoso no tiene lugar en esta membrana, y por lo tanto la impresión es confusa. Alejando el objeto, se aproxima el foco y la visión se hace distinta. Las personas afectadas de este defecto en la vista son las *présbites*, atribuyéndose la presbicia á una disminución del cristalino ó á una rigidez que no le permite adaptarse á las distancias cortas, y también á un aplanamiento del globo del ojo de delante á atrás.

Los *miopes* tienen el defecto contrario: la distancia de la visión distinta es mucho más corta para éstos que para los individuos dotados de vista normal; y á grandes distancias la visión es siempre confusa, lo cual consiste en que, por razones opuestas á las que producen la presbicia, el foco ó la imagen de un punto luminoso se forma delante de la retina (fig. 589). Las causas más frecuentes de la miopía son una exagerada convexidad del cristalino ó una prolongación del globo del ojo: las personas que por su profesión ú ocupaciones tienen que mirar de cerca objetos pequeños suelen padecer esta enfermedad de la vista.

El ojo no es acromático, como se creyó en un principio; pero la dispersión que se produce en sus distintos medios es casi insensible.

Muchos físicos han tratado de averiguar por qué, pintándose las imágenes invertidas en la retina, las vemos en sus posiciones reales, esto es, derechas. Para explicar esta singularidad aparente se han emitido varias hipótesis más ó menos ingeniosas, pero que, á nuestro juicio, carecen de sentido, puesto que la cuestión en sí no significa nada. En primer lugar, la imagen que se pinta en la retina no es para nosotros un objeto que examinamos como si aún tuviéramos otro ojo detrás de dicha membrana; pues, á decir verdad, los objetos exteriores y nosotros mismos, nuestro propio cuerpo, los vemos en sus posiciones relativas exactas: esto es cuanto necesitamos, y cuando decimos que vemos un objeto, un árbol por ejemplo, derecho y no al revés, esto tan sólo significa que su cabeza nos parece como elevada al aire y los pies tocando al suelo, absolutamente en el mismo sentido que nuestra propia cabeza y nuestros pies en nuestra posición normal.

Si por una disposición particular de nuestro ojo, análoga á la de ciertas lentes, las imágenes se formaran derechas en la retina, es casi indudable que nuestra percepción en nada cambiaría; para que otra cosa ocurriera sería necesario exceptuar la imagen de nuestro cuerpo, lo cual no es admisible.

II

PERSISTENCIA DE LA IMPRESIÓN LUMINOSA

La impresión que produce la luz en la retina, la sensación que de ella resulta no cesan tan luego como deja de obrar la causa que las da origen. En una palabra, la acción de la luz puede ser sumamente breve, pero la sensación persiste algún tiempo, cuya duración depende de la intensidad de la luz á la vez que del estado de cansancio del ojo.

Fáciles son de observar los hechos que prueban esta persistencia: citemos algunos.

Cuando se dirige la vista á un objeto muy brillante, muy luminoso, al Sol por ejemplo, y en seguida se cierran los ojos bruscamente, ó lo que es lo mismo, si se aparta la vista para mirar un fondo obscuro, se sigue viendo algún tiempo la imagen brillante del disco. Esta imagen *positiva* se amortigua rápidamente y desaparece para

ceder el puesto á otras imágenes *accidentales* de las que diremos después algunas palabras. Pero no es menester que el objeto contemplado tenga una luz tan intensa como la del Sol. Por ejemplo, si desde el interior de una habitación se mira la luz difusa del día que penetra por una ventana, y luego se cierran de pronto los ojos, se ve cómo persiste distintamente la imagen de los rectángulos luminosos formados por los vidrios y limitados por las líneas oscuras de la vidriera.

También es fácil comprobar de otro modo esta persistencia de la impresión luminosa. Basta mover con rapidez un punto brillante, como la punta de una vara quemada, para que se vea, en lugar de una serie de puntos luminosos aislados, una línea de fuego continua. Esta línea se convierte en un círculo, en una curva cualquiera, si se imprime un movimiento circular al extremo de la vara, ó si se la hace describir la curva en cuestión. Los rastros luminosos de los cohetes en los fuegos artificiales, los de las estrellas fugaces, reconocen en gran parte por causa la duración de la impresión luminosa en la retina; decimos *en gran parte*, para que no se confunda la línea de fuego con el rastro, á veces persistente y probablemente material, que se observa después de la desaparición de ciertos bólidos.

Nótase el mismo fenómeno si, estando inmóvil el punto luminoso, se comunica el movimiento á un espejo que refleje su imagen. Hemos visto á Lissajous combinar las reflexiones en dos espejos formando ángulo recto para estudiar las vibraciones de dos diapasones y para comparar los tonos de los sonidos que éstos producen. Las curvas ópticas obtenidas de este modo son indudablemente efecto de la persistencia de las impresiones luminosas sucesivas. Wheatstone había sacado ya partido de esta persistencia con el *Kaleidófono* para estudiar los movimientos vibratorios de una varilla en cuya extremidad había fijado una bolita de cristal: el punto luminoso formado por la reflexión de la luz del día ó por la de un quinqué en este espejo esférico se convertía en curvas continuas cuyas sinuosidades marcaban los cambios de posición ó las oscilaciones de la varilla. También es la persistencia en cuestión la que nos hace ver una cuerda en vibración hinchada por su parte media, y la que nos impide ver los rayos de una rueda en movimiento, cuando la rotación es bastante rápida para que la sensación sea continua.

Se pueden definir los hechos que acabamos de describir sucintamente, diciendo con Helmholtz que "las impresiones luminosas repetidas con suficiente rapidez producen en la vista el mismo efecto que una iluminación no interrumpida." Esto es cierto relativamente á la luz considerada no tan sólo por lo que atañe á la intensidad, sino también al color. El experimento del disco giratorio como lo hizo Newton, y que dejamos descrito en el capítulo VII, demuestra claramente cómo se sobreponen, ó mejor dicho, cómo se mezclan las sensaciones sucesivas de distintos colores cuando su sucesión es bastante rápida, y producen la sensación de un solo color que es la síntesis de los colores componentes.

Se ha procurado valuar la duración de la persistencia luminosa. D'Arcy en el siglo pasado, Aimé en el actual, y después Plateau, han hecho con tal objeto algunas series de experimentos por diferentes métodos. El primero dedujo que dicha duración era de 0^s,13. El método de Aimé consistía en hacer girar en sentido contrario dos discos armados en un mismo eje, uno de los cuales tenía en su contorno una porción de agujeritos equidistantes é iguales, al paso que el otro disco no tenía más que uno. Mientras la rotación es lenta no se ve á la vez más que una abertura luminosa, cuando el único agujero del segundo disco pasa por delante de los otros; pero si el movimiento es bas-