

superficies: mientras más pronunciada es esta última, menos considerable es la distancia focal, lo que se expresa diciendo que la lente es de foco corto.

Si se coloca la lente en la rendija de la cámara obscura, puede observarse en el aire la marcha convergente de los rayos, pues el cono luminoso se echa de ver por la iluminación de las partículas de polvo que flotan en la cámara.

La convergencia de los rayos luminosos producida por las lentes biconvexas se explica fácilmente comparándola con la marcha de la luz refractada á través de un prisma. Sábese que el efecto producido por este último medio consiste en desviar el rayo luminoso hacia la base del prisma. Pues bien, podemos considerar una de dichas lentes como si estuviera formada por una serie de prismas superpuestos, cuyo ángulo es tanto más agudo cuanto más se aproximan al eje principal, siendo la desviación más considerable también según que el ángulo sea de mayor abertura. La figura 489 basta para dar cuenta de la convergencia de los rayos, y la práctica juntamente con la teoría de-

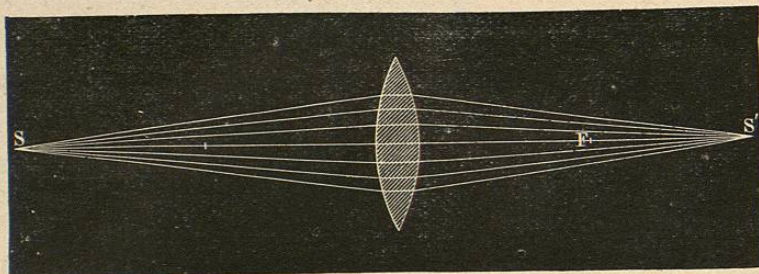


Fig. 490.—Marcha de los rayos emanados de un punto luminoso sobre el eje. Focos conjugados

muestran que el punto de reunión está en el eje principal, con tal que los rayos pasen muy inmediatos al eje.

Examinemos las diferentes circunstancias que se presentan cuando el punto luminoso S se acerca progresivamente á la lente en el eje principal. La explicación es la misma cuando los rayos luminosos, en lugar de partir de un punto situado á una distancia infinita, proceden de una luz situada en el eje á una distancia finita; sólo que en este caso el foco no coincide con el foco principal. Mientras se encuentra este punto hacia un lado de la lente más allá de la distancia focal, su foco S' se forma en el eje más allá del foco principal, y cuanto más se aproxima, más se aleja este foco. Cuando sólo se halla separado de la lente el doble de la distancia focal, el foco correspondiente se encuentra precisamente á la misma distancia. Si se acerca aún á la lente, el foco continúa alejándose con rapidez, hasta que el punto luminoso llega á la distancia focal con toda exactitud y desaparece su foco, ó, lo que es lo mismo, se aleja al infinito.

Hasta aquí la convergencia de los rayos luminosos se efectúa en realidad después de salir de la lente; el foco es *real*, de lo que podemos cerciorarnos con facilidad recibiendo el cono luminoso en una pantalla, donde los rayos concentrados producirán una imagen del objeto, un punto luminoso si este objeto lo es. Además, los dos puntos del eje en donde se encuentran el objeto por una parte y el foco por otra, son recíprocos entre sí, es decir, que si el foco S' llega á ser el punto luminoso, la posición primera S de este punto marcará el nuevo foco (fig. 490). Por esta causa dan los físicos á tales puntos, que se determinan por el cálculo cuando se conoce la distancia focal principal, el nombre de *focos conjugados*. Al tratar de los espejos hemos visto que ocurría el mismo caso.

Prosigamos nuestro estudio.

El punto luminoso S parte del foco principal y se acerca á la lente; su distancia es menor que la focal (fig. 491). Entonces los rayos luminosos se alejan del eje ó divergen después de su emergencia, de suerte que ya no hay foco real; pero el haz divergente, prolongado hacia el mismo lado que el objeto, converge todavía en el eje, donde forma un foco virtual S'. Entonces ya no es posible recoger este haz en una pantalla, pero el ojo recibe los rayos luminosos como si emanaran de este foco, y la impresión que siente es la que le produciría una imagen del punto luminoso formado en S'. Cuando más se acerca el objeto á la lente, más se aproxima también la imagen, y al llegar el objeto á ponerse en contacto con la superficie transparente, la imagen llega al mismo tiempo que él.

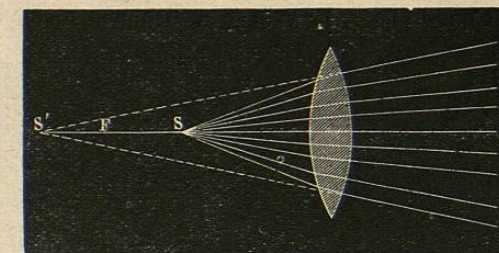


Fig. 491.—Marcha de los rayos emanados de un punto situado entre el foco principal y la lente. Foco virtual

La marcha de los rayos luminosos en una lente plano-convexa ó en una menisco convergente es la misma que en la lente biconvexa, y únicamente varía la distancia focal con la forma, el grado de curvatura y el espesor.

IV

IMÁGENES FORMADAS POR LAS LENTES

Todos estos resultados se demuestran por el cálculo, pero la práctica puede hacerlos patentes, y así lo efectuaremos examinando las imágenes reales y virtuales que se forman en los focos de una lente biconvexa ó, hablando en general, de una lente convergente, cuando se la pone delante de un objeto luminoso.

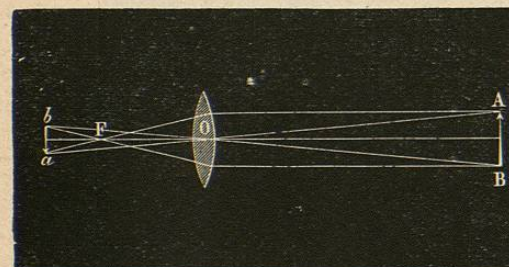


Fig. 492.—Imagen real, invertida y menor que el objeto

Hemos visto ya cómo se forma la imagen de un objeto cuya distancia puede considerarse como infinita y que envía á la lente un haz de rayos paralelos; por esto el Sol da una imagen en el foco principal de la lente. Si el objeto AB está á una distancia finita, pero superior al doble de la distancia focal principal, la imagen ab se formará más allá del foco (fig. 492); será real, invertida y más pequeña que el objeto. Valgámonos de una bujía para hacer el experimento, y recibamos la imagen en una pantalla que acercaremos ó alejaremos de la lente hasta que adquiera toda la pureza apetecible. Cuando más disminuye la distancia de la bujía, más se alejará y agrandaré la imagen, siempre real, hasta que sea precisamente igual al objeto mismo.

Si en este instante se miden las distancias que hay de la lente á la pantalla y á la bujía, se ve que son iguales entre sí, y cada una de ellas el doble de la distancia focal principal; si se continúa acercando la bujía á la lente, la imagen real se agranda y aleja,

siendo por tanto sus dimensiones mayores que las del objeto (figs. 493 y 494): es menester alejar cada vez más la pantalla para recibir la imagen con pureza; pero entonces se observa una disminución en su brillo que se explica por la dispersión de los rayos luminosos salidos de la lente, en una superficie que crece con más rapidez que la cantidad de luz que recibe.

Cuando llega la vela á la distancia focal, la imagen desaparece, lo cual se comprende fácilmente, puesto que saliendo entonces los rayos paralelamente al eje, ya no hay convergencia. Hasta aquí la imagen ha sido siempre real, ó en otros términos, no ha habido dificultad para recibirla en la pantalla; tiene una existencia independiente del observador; pero no sucederá lo propio si seguimos acercando la bujía ó cualquier otro objeto á la lente: porque en este caso la pantalla situada á cualquier distancia no recibirá

ni reflejará más que luz difusa. Pero si en el sitio de la pantalla ponemos nuestro propio ojo, veremos á través de la lente una imagen de la bujía, que ya no estará invertida, sino derecha y ampliada. ¿En qué consiste que el ojo reciba la sensación de una imagen que ya no tiene nada de real? No es difícil de comprender: los haces luminosos

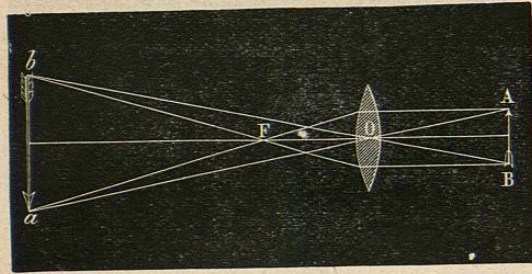


Fig. 493.—Imagen de un objeto situado á una distancia mayor de la lente que la distancia focal principal, y menor que el doble de esta distancia.

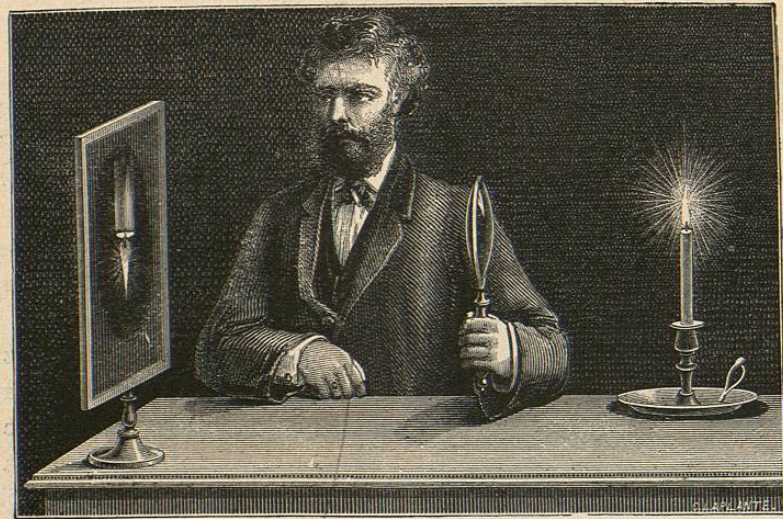


Fig. 494.—Imagen real, invertida y mayor que el objeto

que cada uno de los puntos del objeto envía entonces á la lente, salen divergiendo del medio refringente; el ojo que los recibe experimenta la misma sensación que si fuesen rayos emanados directamente de puntos luminosos situados al otro lado de la lente, pero á mayor distancia que el objeto á que pertenecen. De aquí resulta la amplificación de las dimensiones aparentes, y también la posición de la imagen, que, siendo ya virtual, deja de estar invertida (fig. 495). En este caso, á medida que se acerca el objeto á la lente, va disminuyendo la imagen hasta que, tocando ésta una de sus caras, se hace sensiblemente igual á aquél.

Esto por lo que respecta á las imágenes producidas por las lentes convergentes.

Las divergentes no tienen foco real: si consideramos, por ejemplo, un haz de rayos paralelos al eje—ó sea el caso en que el punto luminoso está situado á una distancia infinita,—los rayos divergen al salir de la lente; su punto de reunión F (fig. 496) está situado en el eje delante de aquélla; es lo que se llama foco principal, foco que ya no es real, sino virtual. El ojo, que recibe el haz luminoso al salir de la lente, experimenta la misma sensación que si en realidad hubiera un punto luminoso en el foco.

Con las lentes divergentes tampoco hay nunca imagen real, por la razón de que, alejándose unos de otros los rayos luminosos al salir del medio refringente, no tienen punto efectivo de reunión. Pero aplicándoles lo que acabamos de decir respecto al caso en que la imagen dada por una lente convergente es recta y virtual, se comprenderá que las de las lentes divergentes serán asimismo

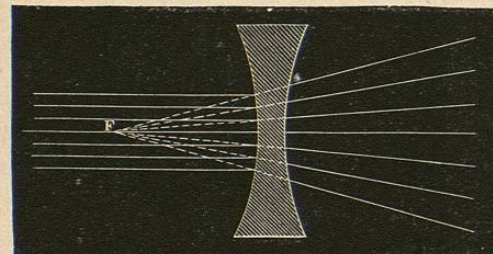


Fig. 496.—Foco principal virtual de las lentes divergentes

rectas y virtuales. La figura 497 demuestra la razón de este último hecho, permitiendo comprender por qué las imágenes, que son tanto más pequeñas cuanto más distante se halla el objeto, acaban por tener el tamaño de éste cuando llega á tocar la lente. El uso de las lentes convergentes ó divergentes en los experimentos de física, ó su aplicación á los instrumentos de óptica, requiere que se conozca su foco ó su distancia focal principal. Hay fórmulas mediante las cuales se puede calcular esta distancia cuando se conoce el índice de refracción de la substancia que compone la lente, así como los radios de curvatura de las superficies que la terminan; pero también se puede determinar esta distancia focal por medio de experimentos muy sencillos, si no muy exactos.

Véase cómo se procede cuando se trata de una lente convergente: se reciben los rayos del Sol paralelamente al eje, y luego, con una pantalla que se acerca ó se aleja, se busca la posición en la que la imagen circular proyectada en ella es lo más pequeña posible. Cuando se ha dado con esta posición, la pantalla se encuentra precisamente en el foco principal.

También se puede apelar á otro medio. Se proyecta en una pantalla la imagen real de un objeto formada con auxilio de una lente, y se desvía la pantalla ó el objeto hasta que sus dimensiones sean iguales. Hemos visto que, en este caso, uno y otra están á la

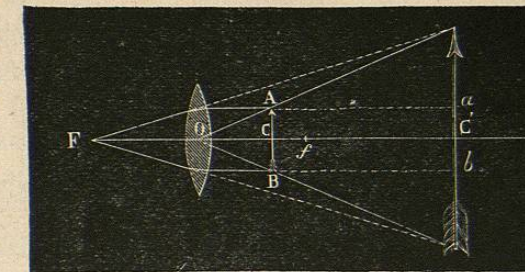


Fig. 495.—Imagen recta y virtual de un objeto situado entre el foco principal y la lente

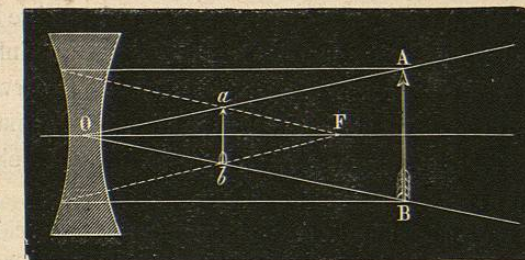


Fig. 497.—Imagen recta virtual y menor que el objeto en una lente biconcava

misma distancia de la lente, distancia que es doble de la focal principal. Tendremos, pues, esta última midiendo el intervalo comprendido entre el objeto y su imagen y tomando la cuarta parte.

Si se trata de una lente divergente, se cubre su superficie con un pedazo de papel negro ó con negro de humo, y se hacen dos agujeritos en un mismo círculo máximo de

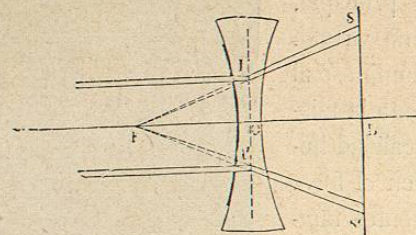


Fig. 498.—Determinación experimental de la distancia focal de una lente divergente

la superficie y á igual distancia del eje (fig. 498). Dirigiendo entonces los rayos solares sobre la lente, se busca con una pantalla la posición en la cual los dos haces divergentes IS, I'S', que pasan por los agujeros, dejan huellas S y S' cuya distancia es el doble de la de los agujeros. El intervalo OB comprendido entre la pantalla y el centro óptico de la lente es sensiblemente igual á la distancia focal buscada.

CAPITULO VII

DISPERSIÓN DE LA LUZ

I

DESCOMPOSICIÓN DE LA LUZ SOLAR POR LA REFRACCIÓN

El paso de un haz luminoso de un medio refringente á otro medio, no tan sólo produce, cuando la incidencia es oblicua á la superficie de separación, el fenómeno de desviación que acabamos de estudiar con el nombre de *refracción simple*, sino que por lo regular va acompañado de modificaciones que influyen en el color de la luz transmitida. Fácil es comprobar estas modificaciones, observando las imágenes de los objetos tal como se las ve al través de un prisma ó de una lente ordinaria. Ya hemos indicado que casi siempre están rodeadas de vivos colores que reproducen los matices del arco iris.

La coloración de las imágenes por la refracción es lo que se llama *dispersión de la luz*, y dimana de que la del Sol y las de los diferentes focos luminosos, directos ó secundarios, no son por lo común luces simples ú homogéneas, sino que en realidad se componen de una multitud de rayos, cada uno de los cuales tiene un grado particular de refrangibilidad: al pasar á través de un medio refringente se descomponen; los rayos desigualmente refrangibles se dispersan, y cada uno de ellos aparece entonces con su color propio. De aquí resulta el fenómeno que vamos á estudiar y que se conocía hacía mucho tiempo por varios de sus efectos, cuando Newton descubrió su causa y formuló su ley.

Diariamente se ofrece á nuestra vista la dispersión de la luz blanca por refracción mediante un gran número de fenómenos que los antiguos conocieron sin duda como nosotros (1), pero sin sospechar su causa. Las piedras preciosas, los diamantes lanzan destellos de varios colores, no siendo una de las menores bellezas de tan preciosas sustancias la que procede de la descomposición de los rayos luminosos á través de sus facetas. El arco iris es un fenómeno debido á igual causa, como lo demostraremos al describir los meteoros. Lo propio sucede con esos variados colores de que aparecen teñidas las nubes y las capas atmosféricas en los crepúsculos matutinos y vespertinos. Por último, en los vasos de cristal que contienen líquidos transparentes, en los colgantes de las arañas, se ven franjas irisadas en todas direcciones, las cuales presentan los colores más vivos en toda su pureza.

Si en el interior de la cámara oscura se recibe directamente la luz solar sobre una pantalla de papel blanco, después de haber hecho pasar un rayo del astro por un agujero abierto en la ventana, la imagen del Sol en el papel será, como ya sabemos, una mancha redonda y blanca. Pero esta luz blanca no es simple, sino un compuesto de multitud de colores ó matices que son á su vez otros tantos colores simples ó compuestos, resultado que se ha puesto fuera de duda en virtud de una serie de experimentos que se han variado hasta lo sumo, y en su mayoría efectuados por Newton. Indiquemos los más concluyentes.

Se coloca en el camino de los rayos solares, después de su paso por el agujerito de la ventana de la cámara oscura, un prisma triangular de flint-glass, por ejemplo, de modo que sus aristas estén en dirección horizontal y que el haz luminoso penetre oblicuamente por una de sus caras. Entonces se ve en la pantalla, en vez de la imagen redonda y blanca del Sol y á cierta distancia sobre el punto en que se formaba antes de la interposición del prisma, una faja prolongada (2) luminosa, compuesta de una serie de colores en extremo brillantes: esta faja es lo que se llama el *espectro solar*.

Véase en qué orden se suceden los colores cuando el prisma presenta su base vuelta hacia arriba, orden que sería inverso si dicha base estuviese vuelta hacia el piso de la cámara oscura:

En el extremo inferior del espectro aparece un rojo vivo, brillante y despejado, al cual sucede una tinta anaranjada, y por gradaciones insensibles un amarillo de paja magnífico: viene luego un verde de pureza é intensidad notables, después una tinta azul verdosa, y en seguida un color azul oscuro hasta llegar al añil, terminando el espectro en el tono lívido del morado. En la figura 1 de la lámina adjunta se puede ver

(1) Séneca se esfuerza por buscar una explicación del arco iris y de sus colores en el primer libro de sus *Cuestiones naturales*. A vueltas de una disertación un tanto larga y difusa enumera algunos hechos de observación que prueban que en la época en que escribía el filósofo romano se conocían muchos efectos de la reflexión, de la refracción y de la dispersión de la luz, los espejos cóncavos, las lentes, etc. "El agua que brota de un tubo roto, dice, ¿no presenta algo parecido á los colores del arco iris?". Y en otra parte: "Se fabrican barritas de vidrio acanaladas ó con muchos ángulos salientes, que si reciben transversalmente los rayos del Sol, presentan las tintas del arco iris."

(2) Conviene advertir que la imagen del Sol, primitivamente redonda, resulta dilatada en dirección perpendicular á la arista del prisma interpuesto: lateralmente, la faja es de anchura igual al diámetro de la imagen redonda. Si se varía la inclinación del prisma ó la incidencia del haz, la faja luminosa y coloreada cambia de longitud; pero hay una posición, la de la desviación mínima, en la cual la dilatación de la imagen solar debería ser nula, si todos los rayos que componen el haz tuviesen la misma refrangibilidad. Pues bien, Newton ha observado perfectamente que, en semejante posición del prisma, la prolongación de la imagen persiste lo propio que la coloración de sus diferentes partes.