

rectamente las desviaciones que corresponden á las diferentes alturas de los astros; mas por fortuna la astronomía ha venido en auxilio de la física. Siendo invariable la distancia angular de toda estrella al polo celeste á cualquier altura que el movimiento diurno la lleve sobre el horizonte, las diferencias que la observación consigna entre las distancias obtenidas desde la mayor altura hasta el horizonte mismo no pueden proceder sino de la refracción atmosférica. De aquí la posibilidad de construir una tabla de refracciones atmosféricas, desde el horizonte hasta el zenit, tabla muy útil para deducir de la posición aparente de un astro el aumento de altura debido á la refracción, y averiguar así su posición verdadera.

La refracción llega en el horizonte á cerca de 34'. Como el valor del diámetro del Sol y de la Luna es menor, resulta que en el mar, donde ningún objeto oculta el límite del horizonte, el disco del Sol aparece entero sobre la sábana líquida mucho antes que la cúspide del astro se ostente por encima de este límite, es decir, que se le ve antes de su completa salida. Por consiguiente la refracción contribuye á alargar el día por la mañana, sucediendo lo propio por la tarde al ponerse el Sol.

El mismo fenómeno sirve para explicar una curiosa particularidad observada en muchos eclipses de Luna, y es que este astro se ve eclipsado estando el Sol visible todavía en el horizonte occidental. Finalmente, también es la refracción atmosférica la que, permitiendo en los eclipses totales de Luna que cierta cantidad de rayos lleguen á nuestro satélite, impide que su disco sea completamente invisible. Este disco suele presentar entonces una marcada coloración rojiza, semejante á la que tiene la atmósfera en el momento de ponerse el Sol.

Aquí nos limitamos á hacer algunas ligeras indicaciones sobre un fenómeno cuyo estudio es de la mayor importancia para la astronomía de observación; pero las completaremos más adelante en la parte de este volumen que consagraremos á la óptica meteorológica.

## CAPITULO VI

### REFRACCIÓN EN LOS PRISMAS Y EN LAS LENTES

#### I

##### REFRACCIÓN EN LAS LÁMINAS TRANSPARENTES DE CARAS PARALELAS

Las leyes de la refracción, tal como las hemos visto formuladas en el capítulo anterior, permiten resolver todas las cuestiones que tienen por objeto la marcha de los rayos ó de los haces luminosos, cuando han de atravesar medios de refringencia desigual, para lo cual basta conocer los índices de refracción de estos distintos medios, así como la forma de las superficies de separación. Poseyendo estos datos, las cuestiones que se han de resolver son de incumbencia de la geometría y del análisis.

Como se comprenderá, aquí nos limitaremos á apuntar algunas indicaciones sobre tales cuestiones, concretándonos á las soluciones más sencillas y recurriendo las más veces á la práctica para su comprobación. Esto nos bastará para la inteligencia de las aplicaciones de la óptica, ya por lo que respecta á los instrumentos más usados, ya por

lo referente á la explicación de los fenómenos naturales que dependen de la refracción.

Ante todo veamos lo que ocurre cuando un rayo de luz penetra en láminas refringentes terminadas en superficies planas y paralelas. Cuando se examina un punto luminoso á través de una lámina de substancia transparente, verbigracia de vidrio, cuyas dos caras planas son paralelas, si el ojo y el punto están en una misma perpendicular á la lámina, se ve el punto luminoso en la dirección exacta en que se le vería sin interposición de ningún medio refringente, lo cual consiste en que no hay refracción para los rayos normales.

Pero no sucede lo mismo con respecto á la incidencia oblicua, pues en este caso se desvía el punto luminoso, desviación que se puede demostrar de un modo muy sencillo. Tómese al efecto una lámina de vidrio, colóquesela sobre un papel en el que haya trazadas líneas rectas y curvas de modo que la lámina sólo las cubra en parte, y mirando perpendicularmente se observará que las líneas vistas por transparencia son continua-

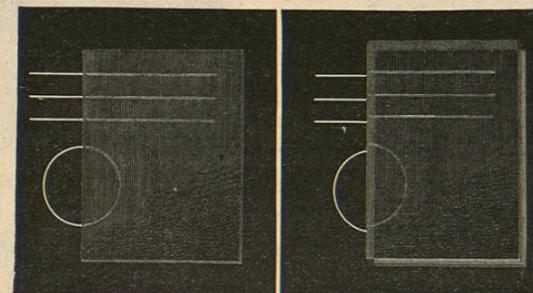


Fig. 474.—Desviación debida á la refracción á través de las láminas de caras paralelas

ción de las vistas directamente. Si se mira en dirección oblicua, se notará una desviación, una solución de continuidad tanto más marcada cuanto más oblicua sea la incidencia de los rayos luminosos. Esta desviación se debe á la refracción y crece también con el grueso de la lámina transparente.

De aquí resulta con toda evidencia que las láminas transparentes, como, por ejemplo, los vidrios, los cristales de los cuadros, etc., deforman las imágenes, puesto que los rayos que llegan á la vista desde varios puntos del cuadro han atravesado el espesor del cristal con incidencias muy distintas, los unos perpendicular y los otros oblicuamente. La desviación, nula para los primeros puntos, no lo es para los últimos. Si el cristal transparente fuese muy grueso, la desviación se vería á primera vista; pero, dado el espesor que suelen tener, ésta es casi imperceptible.

Por lo demás, cuando hablamos de desviación, mejor debiéramos decir dislocación lateral, porque el rayo luminoso que atraviesa una ó muchas láminas de caras paralelas conserva después de su emergencia una dirección paralela á la del rayo incidente, como lo demuestra con bastante evidencia la figura 475. Esta propiedad es consecuencia del paralelismo de las normales en los puntos de incidencia y emergencia, y también de las leyes de refracción para dos medios de refringencia dada. La experiencia demuestra que los rayos son siempre paralelos cuando salen después de atravesar cierto número de láminas, aunque éstas no estén compuestas de substancias idénticas ni tampoco situadas paralelamente; y la teoría hacía ya prever este resultado. Finalmente, otro tanto acontece cuando las láminas de substancias diferentes están contiguas. En todo caso, la dislocación lateral depende de la refringencia de las substancias y del grueso de las láminas.

Si se pone una bujía enfrente de un espejo, y el observador se coloca oblicuamente para examinar la imagen de aquélla, verá delante de la imagen brillante formada en la cara interior azogada otra más tenue procedente de la cara exterior de la luna, y además una serie de imágenes todavía más débiles situadas detrás de la primera. Estas últimas se deben á los rayos, que después de refractarse una vez en el espesor de la

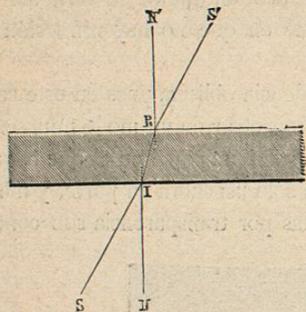


Fig. 475.—Marcha de un rayo luminoso á través de una lámina de caras paralelas

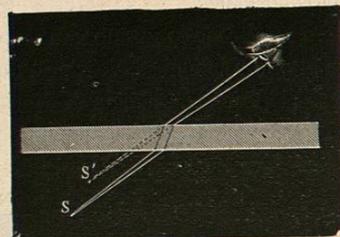


Fig. 476.—Marcha de un haz luminoso

lámina, resultan reflejados parcialmente por la cara azogada y por la interior de la superficie externa del espejo. La figura 478, que representa la marcha sucesiva de estos rayos, hace patente el fenómeno que acabamos de describir y cuya demostración es fácil. S' es la imagen del punto S formada por la reflexión directa de la superficie ante-



Fig. 477.—Imágenes múltiples producidas por la refracción en las láminas de caras paralelas

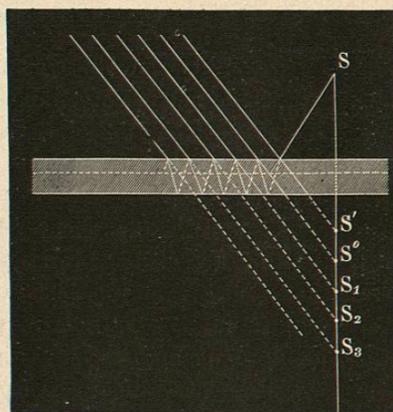


Fig. 478.—Marcha de los rayos que producen las imágenes múltiples de las láminas de caras paralelas

rior no azogada; S' es la imagen más brillante que procede de la reflexión en la cara azogada; el haz que la forma se ha refractado á su entrada en el cristal, se ha reflejado por completo y ha vuelto á salir después de una nueva refracción; pero en esta salida sólo ha emergido una parte de los rayos de regreso; los otros se han reflejado en la cara interna de la superficie exterior del cristal, y así sucesivamente, resultando de aquí las imágenes sucesivas, pero muy debilitadas, del punto luminoso, las cuales son tanto más distintas cuanto más oblicuamente se las mira; el observador sólo vería una si se situara perpendicularmente enfrente del punto.

II

REFRACCIÓN EN LOS PRISMAS

Examinemos ahora los fenómenos que dependen de la refracción de la luz cuando atraviesa un medio refringente cuyas caras planas no son paralelas, es decir, los prismas. La figura 479 representa en perspectiva y en corte la forma geométrica del prisma

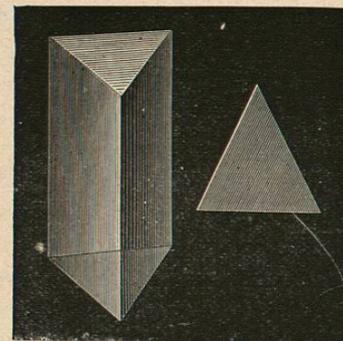


Fig. 479.—Forma geométrica del prisma

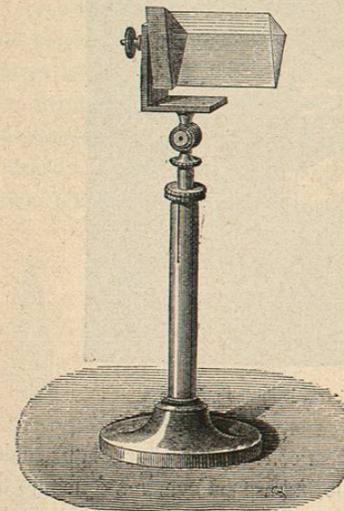


Fig. 480.—Prisma montado sobre un pie

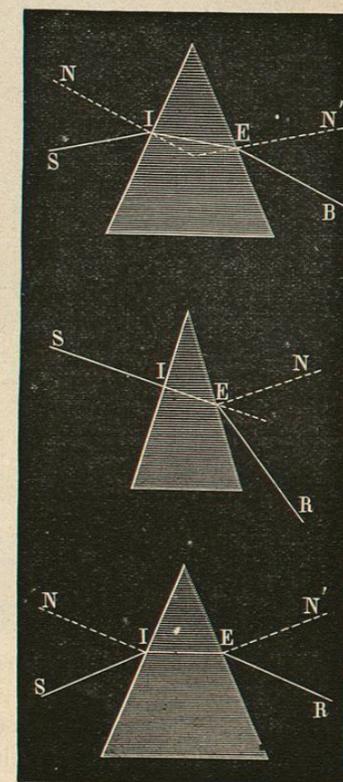


Fig. 481.—Desviación de los rayos luminosos por los prismas

tal y como se usa en óptica. Para hacer los experimentos se le suele montar sobre un pie, de modo que se le pueda girar como se quiera (fig. 480); con este objeto, el eje alrededor del cual está sujeto paralelamente á su arista remata en un botón merced al cual se da vuelta al prisma sobre dicho eje, y hace que sus caras tomen todas las inclinaciones apetecibles. El pie está á su vez provisto de una charnela alrededor de la cual se puede mover el prisma, dándose también á su arista una inclinación cualquiera.

El efecto de un prisma sobre un rayo luminoso que penetra por una de sus caras, la atraviesa y sale por la otra cara, consiste en desviar el rayo hacia la parte de la base.

Basta examinar la figura 481, que representa la marcha de los rayos incidentes y refractados, para patentizar este fenómeno; el rayo incidente SI, después de sufrir una refracción, recorre en el prisma el camino IE, se refracta de nuevo al salir del prisma, y por último emerge en la dirección ER. Así lo confirma la observación, pues si se examina un objeto con un prisma, colocando su arista en posición horizontal, se ve que la imagen aparece levantada si la base es inferior, y más baja si la base ocupa la posición opuesta.

Y en efecto, el ojo ve el punto luminoso en la dirección de los rayos que penetran en su interior y en el punto de su convergencia. Si, según acabamos de ver, el haz di-

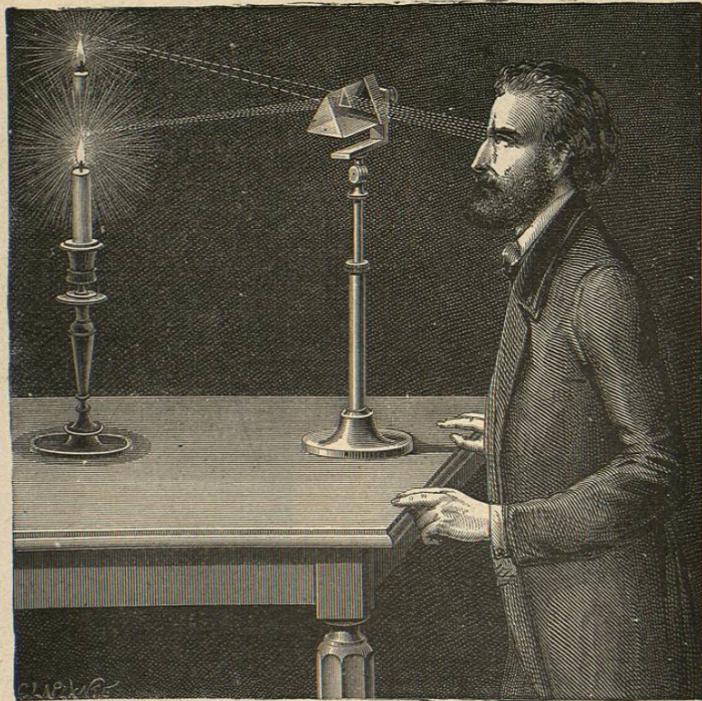


Fig. 482.—Imágenes de los objetos vistos á través de los prismas

verge acercándose á la base del prisma, se efectuará su convergencia hacia la parte del vértice, y el ojo verá el punto alto ó bajo según que la base esté encima ó debajo de la arista (fig. 482). La desviación es tanto mayor cuanto más considerable el ángulo del prisma, si permanece constante el de incidencia de los rayos. En un mismo prisma crece el ángulo de emergencia á medida que el rayo incidente se aproxima á la normal, y hay una dirección en la cual se llega al ángulo límite de la reflexión total. En este caso ya no hay emergencia, lo cual depende, por otra parte, de la substancia de que se componga el prisma: si se trata de uno de vidrio de  $45^\circ$ , no puede salir ningún rayo luminoso que caiga por encima de la normal hacia el lado del vértice, pues el ángulo límite es de  $45^\circ$  para el vidrio; pero los que caen hacia el lado de la base dan rayos emergentes. Un prisma cuyo ángulo excediera del doble del ángulo límite ( $82^\circ$  para el vidrio), cuya base se ennegreciera y al que se colocara transversalmente á la entrada de una cámara oscura de modo que la tapase, no dejaría penetrar en el interior ningún rayo de luz.

Más adelante describiremos los fenómenos de coloración que se observan en los haces luminosos desviados por los prismas: estudiemos antes la marcha de la luz cuando atraviesa medios refringentes terminados en superficies curvas.

## III

## REFRACCIÓN DE LAS LENTES

Si se corta de un pedazo de vidrio, ó de otra substancia refringente, un disco cuyas dos caras sean convexas y tengan la forma rigurosa de dos porciones de esfera, se tiene lo que se llama una *lente*. Conforme veremos, hay varias clases de ellas, pero la que acabamos de describir es la que forma el instrumento llamado *crystal de aumento*, tan usado por muchas personas, como naturalistas, grabadores, relojeros, etc., que tienen precisión de ver con mayor número de detalles las partes más diminutas de los objetos.

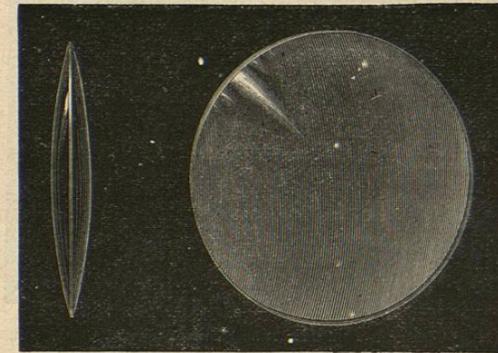


Fig. 483.—Anteojo ó lente de caras convexas

Parece indudable que las lentes de vidrio y sus efectos amplificadores se conocen desde hace mucho tiempo: se han encontrado objetos análogos cuyo empleo óptico no parece dudoso en las excavaciones de Nínive y en las de Pompeya y Herculano. En Europa se usan los anteojos desde principios del siglo XIV; pero tan sólo hace unos trescientos años que, gracias al conocimiento de

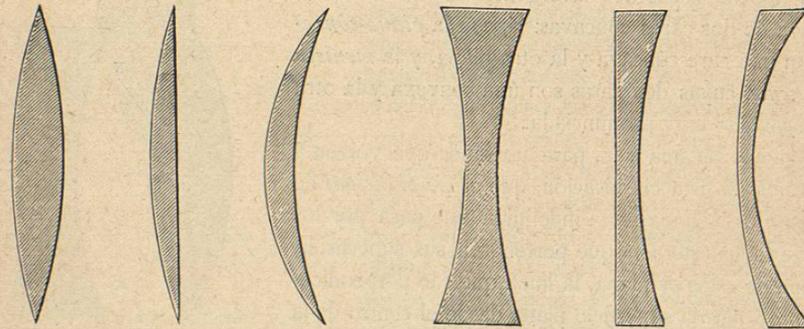


Fig. 484.—Lentes convergentes. Lente biconvexa; lente plano-convexa; menisco convergente

Fig. 485.—Lentes divergentes. Lente bicóncava; lente plano-cóncava; menisco divergente

las leyes rigurosas de la refracción, han podido los ópticos construir y combinar cristales de modo que se obtenga exactamente con ellos el efecto que se desee.

Los físicos han dado por extensión el nombre de lentes á todas las masas transparentes terminadas, por una cara al menos, en superficies curvas, esféricas, cilíndricas, etcétera, aun cuando estas superficies sean cóncavas en vez de convexas como las del cristal de aumento. Por lo regular, y á menos que se diga expresamente lo contrario,

las dos superficies de las lentes son esféricas, ó bien una plana y otra esférica (así lo supondremos siempre en el curso de esta obra); pero todas ellas pueden agruparse en dos clases según la marcha que sigue la luz que las atraviesa. Las unas, como el cristal de aumento, son *convergentes*, es decir, que los rayos luminosos se encuentran más próximos después que antes de su paso. Las otras son *divergentes* porque, al contrario, los rayos se separan ó divergen cuando salen del medio refringente que las forma. Por lo demás, hay un medio muy sencillo de distinguir-las á primera vista; todas las lentes convergentes son más gruesas en el centro, de suerte que sus bordes son afilados: las lentes divergentes son más delgadas en el centro que en los bordes.

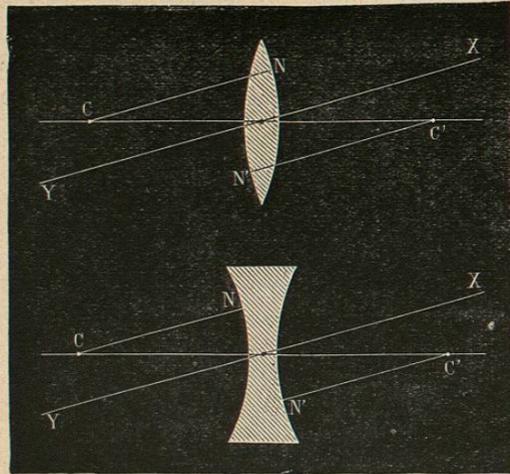


Fig. 486.—Eje principal y eje secundario. Radios de curvatura de las lentes

Hemos dicho que el tipo de la lente convergente es el cristal de aumento *biconvexo*, cuyas dos caras, por lo común de la misma curvatura, son abultadas. Sigue luego la lente *planoconvexa*, una de cuyas caras es plana y la otra convexa. Por último, la tercera lente convergente es la *menisco convergente*, que tiene una cara cóncava y la otra muy convexa. En la figura 484 se representa cada una de estas lentes vista de canto, ó mejor dicho, por su espesor, suponiéndola cortada en el sentido de uno de sus diámetros.

El tipo de las lentes divergentes es la *bicóncava*, formada de dos caras cóncavas: siguen la *plano-cóncava*, con una cara cóncava y la otra plana, y la *menisco divergente*, cuyas dos caras son una convexa y la otra de concavidad muy pronunciada.

Digamos de una vez, para no tener que volver á ocuparnos de esta clasificación, que el *eje principal* de una lente es la línea recta indefinida que pasa por los centros de las esferas á que pertenecen sus superficies, ó si una de éstas es plana, la línea que cae perpendicularmente sobre la superficie plana desde el centro de la curva. En las lentes convergentes, el eje atraviesa el cristal por su mayor espesor, sucediendo lo contrario en las divergentes.

Las leyes conocidas de la refracción nos demuestran que un rayo de luz que se propaga en dirección del eje atravesará la lente sin desviarse y proseguirá su marcha siguiendo el mismo eje, exactamente lo mismo que si atravesara normalmente una lámina de caras paralelas.

Hay otras líneas que gozan de análoga propiedad, por cuyo motivo se las llama *ejes secundarios*, y son las que en las lentes bicóncavas ó biconvexas cuyas caras tie-

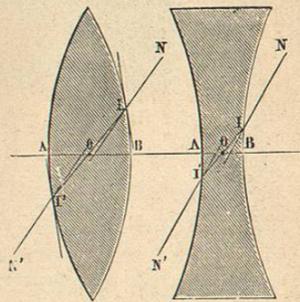


Fig. 487.—Ejes secundarios de las lentes. Centro óptico

nen el mismo radio de curvatura, cortan el eje en medio del espesor máximo ó mínimo:  $IOI'$  (fig. 487) es un eje secundario en cada una de las lentes representadas. Siempre que un rayo luminoso  $NI$  sigue después de su entrada la dirección de una de estas líneas, sale en otra  $N'I'$  paralela á la del rayo incidente, y como los gruesos de las lentes suelen ser muy pequeños, puede decirse que el rayo incidente y el emergido marchan sin desviación en la dirección del eje secundario. Dase el nombre de *centro óptico* de la lente al punto  $O$  donde concurren el eje principal y los secundarios. Si las dos caras no tienen la misma curvatura, el centro óptico sigue estando en el interior, pero no ya á igual distancia de las dos caras. El de las lentes planoconvexas y plano-cóncavas está en la superficie curva, y el de las menisco convergentes y divergentes en la parte exterior de la lente; mas al paso que en las primeras se halla el centro óptico hacia la parte de la cara convexa, las segundas lo tienen hacia la de la cóncava.

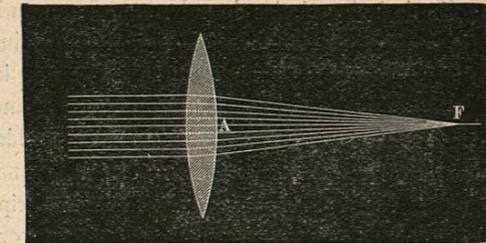


Fig. 488.—Marcha de los rayos paralelos al eje. Foco principal

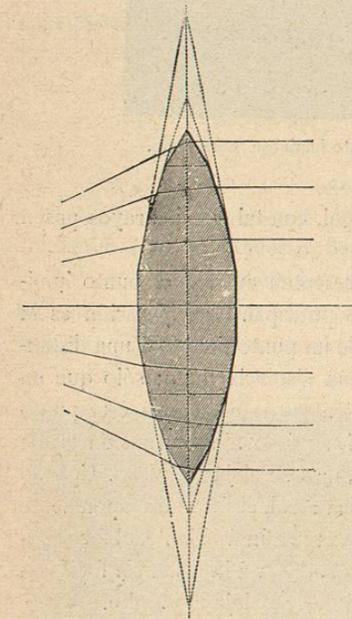


Fig. 489.—La lente considerada como un compuesto de prismas

Para esto la colocaremos al sol, de tal manera que su eje principal sea paralelo á los rayos del astro; luego, recibiendo la luz que sale de la lente sobre una pantalla colocada al lado opuesto y á cierta distancia, percibiremos un círculo luminoso, cuya pureza y dimensiones dependen de la distancia de la pantalla á la lente. Retirándola ó aproximándola poco á poco, acabaremos por encontrar una posición tal que el brillo de dicho círculo llegará á su mayor esplendor, su pureza mayor y sus dimensiones más reducidas: sería un punto matemático si el foco luminoso fuese asimismo un punto. Este punto, al cual van á converger (1) después de su refracción los rayos paralelos al eje principal, se llama el *foco principal* de la lente: la distancia  $FA$  del foco á ésta lleva el nombre de *distancia focal principal* y depende á la vez de la substancia que la compone (es decir, del índice de refracción de esta substancia) y de la curvatura de sus

(1) La convergencia de los rayos luminosos en un mismo punto no es rigurosa sino suponiendo á la lente infinitamente delgada, y su abertura sumamente pequeña. En la práctica no existe, y la falta de concurso de los rayos es lo que se llama *aberración de esfericidad*. Los rayos que así se cruzan, en lugar de reunirse en un punto único, forman curvas que se llaman *cáusticas*. Estas *cáusticas por refracción* son análogas á las de los espejos esféricos, ó *cáusticas por reflexión*.