

por el cual se escapa el agua formando un chorro parabólico. En la parte opuesta al orificio de desagüe hay otro cerrado con un cristal, en el cual se proyecta un haz de luz intensa concentrado por medio de una lente. El haz va á parar al interior del chorro bajo una incidencia oblicua que traspasa el ángulo límite: refléjase al principio totalmente, y luego otra y otra

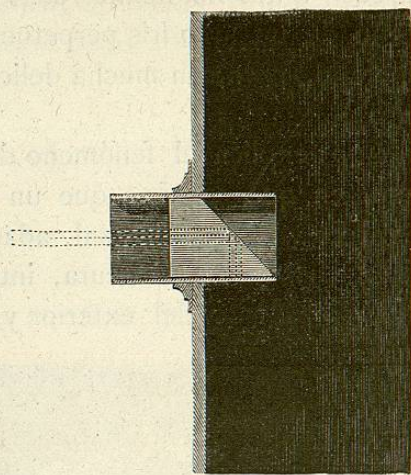


Fig. 65.—Fenómeno de reflexión total en un prisma rectangular isósceles

vez á causa de la curvatura del chorro, y así indefinidamente. Merced á la interposicion de cristales de varios colores, se puede cambiar como se quiera el aspecto de esta especie de *fente luminosa*, que se usa en el teatro en las comedias de magia.

IV

LA REFRACCION EN LA ATMÓSFERA

El fenómeno de la refraccion ocurre siempre que un rayo de luz pasa de un medio á otro, cuando éste difiere del primero por su naturaleza y por su densidad. Es por lo tanto evidente que los rayos luminosos emanados de los astros, Sol, Luna y estrellas, y que despues de marchar por los espacios celestes, han de atravesar las capas atmosféricas para llegar á nuestra vista, sufren una refraccion, y por consiguiente, no vemos los astros en la direccion de las líneas rectas que en realidad reunen á cada uno de ellos con la posicion que ocupamos en la superficie de la Tierra, exceptuándose únicamente los que se hallan en el zenit de cada horizonte.

La refraccion atmosférica depende de la altura angular á que se encuentra sobre el ho-

rizonte el astro observado, como tambien de la ley en virtud de la cual decrecen las densidades de las capas de aire de que se compone la atmósfera. Como los datos que tenemos acerca de esta ley son muy inciertos, hubiera sido sobremanera difícil medir directamente 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 observacion consigna entre las distancias obtenidas desde la mayor altura hasta el horizonte mismo no pueden proceder sino de la refraccion 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 posicion aparente de un astro el aumento de altura debido á la refraccion, y averiguar así su posicion verdadera.

La refraccion 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 ningun objeto oculta el límite del horizonte, el disco del Sol aparece entero sobre la sábana líquida mucho ántes que la cúspide del astro se ostente por encima de este límite, es decir, que

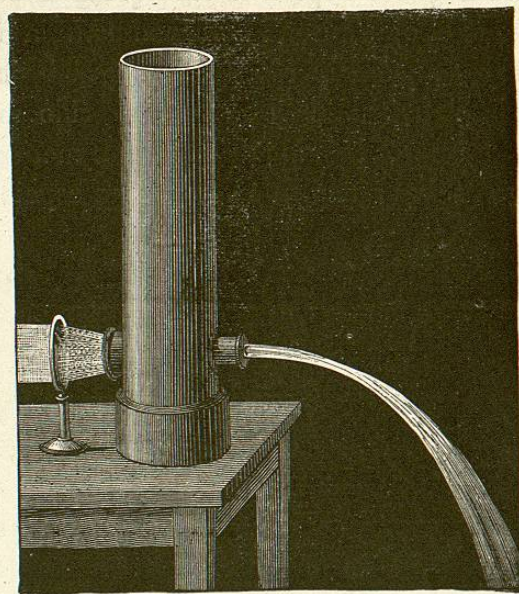


Fig. 66.—Fuente luminosa. Fenómeno de reflexión total

se le ve ántes de su completa salida. Por consiguiente la refraccion 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 tambien es la refraccion 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 entónces una marcada coloracion 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 observacion; pero las completaremos más adelante en la parte de este volúmen que consagraremos á la óptica meteorológica.

CAPITULO VI

REFRACCION EN LOS PRISMAS Y EN LAS LENTES

I

REFRACCION EN LAS LÁMINAS TRASPARENTES DE CARAS PARALELAS

Las leyes de la refraccion, tal como las hemos visto formuladas en el capítulo anterior,

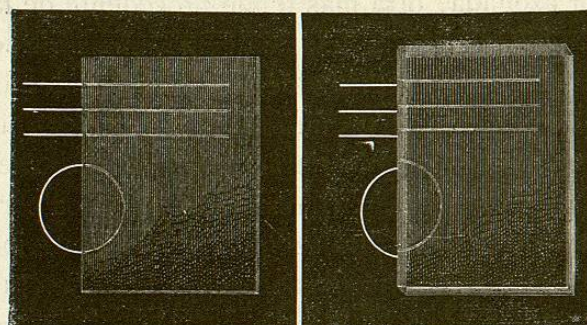


Fig. 67.—Desviacion debida á la refraccion á través de las láminas de caras paralelas

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 refraccion de estos distintos medios, así como la forma de las superficies de separacion. 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 de las veces á la práctica para su comprobacion. Esto nos bastará para la inteligencia de las aplicaciones de la

óptica, ya por lo que respecta á los instrumentos más usados, ó bien por lo que se refiere á la explicacion de los fenómenos naturales que dependen de la refraccion.

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 sustancia trasparente, 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 direccion exacta en que se le veria sin interposicion de ningun medio refringente; lo cual consiste en que no hay refraccion para los rayos normales.

Pero no sucede la mismo con respecto á la incidencia oblicua, pues en este caso se desvia el punto luminoso, desviacion 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 continuacion de las vistas directamente. Si se mira en direccion oblicua, se notará una desviacion, una solucion de continuidad tanto más marcada cuanto más oblicua sea la incidencia de los rayos luminosos. Esta desviacion se debe á la refraccion y crece tambien con el grueso de la lámina trasparente.

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

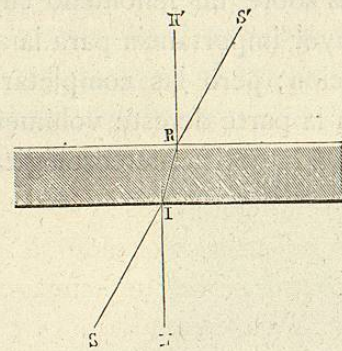


Fig. 68.—Marcha de un rayo luminoso á través de una lámina de caras no paralelas

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 68. 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

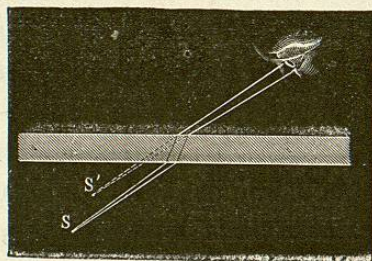


Fig. 69.—Marcha de un haz luminoso

cundo salen después de atravesar cierto número de láminas, aunque estas no estén compuestas de sustancias idénticas ni tampoco situadas paralelamente; y la teoría hacia ya prever este resultado. Finalmente, otro tanto acontece

cuando las láminas de sustancias diferentes están contiguas. En todo caso, la dislocación lateral depende de la refringencia de las sustancias y del grueso de las láminas.

Si se pone una bujía enfrente de un espejo,

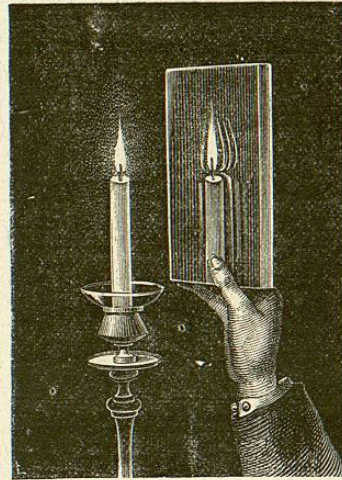


Fig. 70.—Imágenes múltiples producidas por la refracción en las láminas de caras paralelas

y el observador se coloca oblicuamente para examinar la imagen de aquella, 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 lámina, resultan reflejados parcialmente por la cara azogada y por la interior de la superficie externa del espejo. La figura 71, que representa la marcha sucesiva de estos

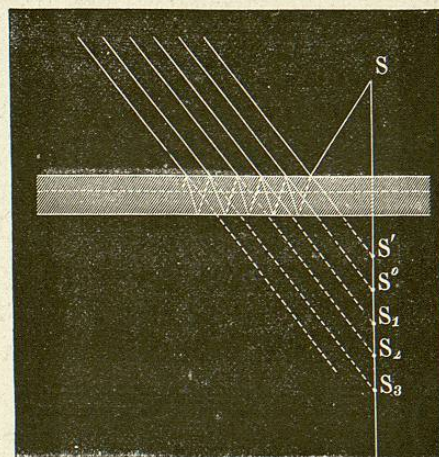


Fig. 71.—Marcha de los rayos que producen las imágenes múltiples de las láminas de caras paralelas

rayos, hace patente el fenómeno que acabamos de describir, y cuya demostración es fácil. S' es la imagen del punto S formada por la re-

flexión directa de la superficie anterior 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

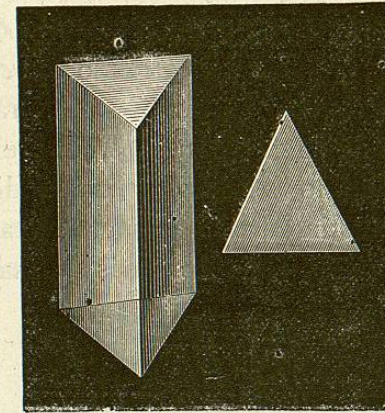


Fig. 72.—Forma geométrica del prisma

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

REFRACCION 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 72 representa en perspectiva y en corte la forma geométrica del prisma 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. 73); 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 lumino-

so 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 74 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, colocándolo 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 diverge 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. 75). 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

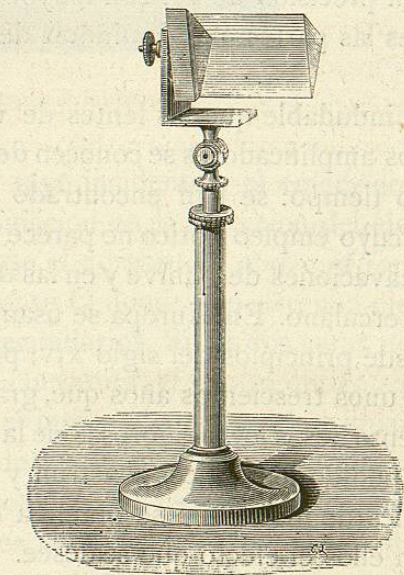


Fig. 73.—Prisma montado sobre un pie

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 sustancia de que se componga el prisma: si se trata de uno de vidrio de 45°, no puede salir ningún rayo luminoso que caiga por encima de

la normal hácia el lado del vértice; pero los que caen hácia el lado de la base dan rayos emergentes. Un prisma cuyo ángulo excediera del doble del ángulo límite (82° 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 ántes la marcha de la luz cuando atraviesa medios refringentes terminados en superficies curvas.

III

REFRACCION DE LAS LENTES

Si se corta de un pedazo de vidrio ó de otra sustancia 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.

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 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, etc., áun 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 segun 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 ántes 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

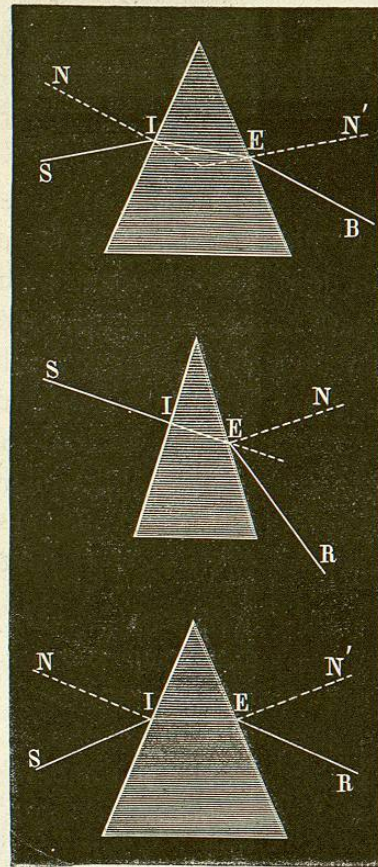


Fig. 74.—Desviación de los rayos luminosos por los prismas

centro, de suerte que sus bordes son afilados: las lentes divergentes son más delgadas en el centro que en los bordes.

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 convexas.

Sigue luego la lente *plano-convexa*, una de cuyas caras es plana y la otra convexa. Por último, la tercera lente convergente, es el *menisco convergente*, que tiene una cara cóncava y la otra muy convexa. En la figura 77 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 el *menisco divergente*, cuyas dos caras son una convexa y la otra de concavidad muy pronunciada.

Digamos de una vez, para no tener que vol-

ver 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 estas 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.

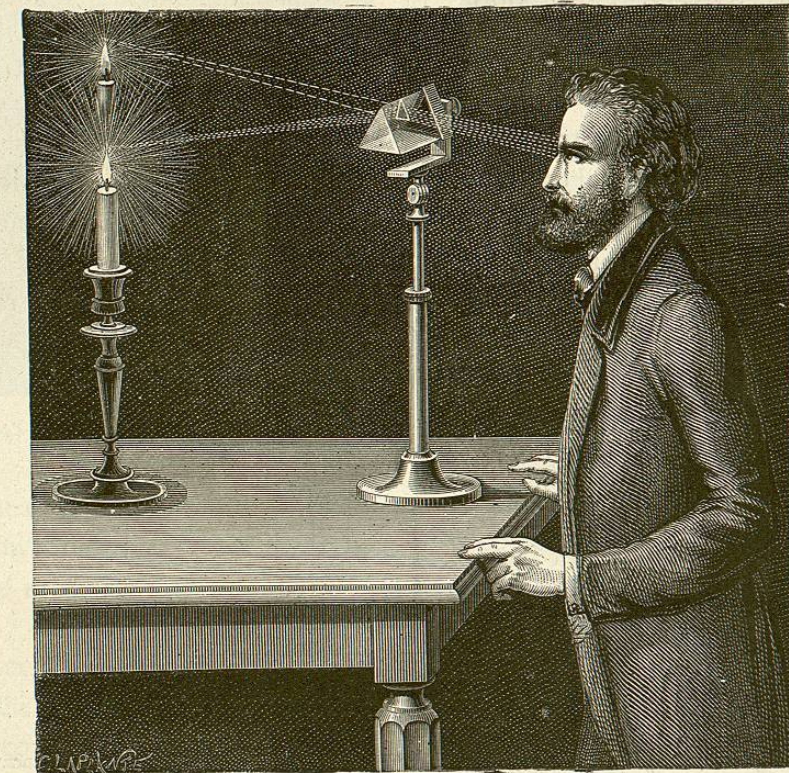


Fig. 75.—Imágenes de los objetos vistos á través de los prismas

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 tienen el mismo radio de curvatura, cortan el eje en medio del espesor máximo ó mínimo: IOI' (fig. 80) 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 plano-convexas y plano-cóncavas está en la superficie curva y el de los meniscos convergentes y divergentes en la parte exterior de la lente; mas al paso que en los primeros se halla hácia la parte de la cara convexa, los segundos lo tienen hácia la de la cóncava.

Suponiendo bien comprendidas estas definiciones, veamos ahora cuál es la marcha de la luz á través de una lente biconvexa.

Para esto la colocaremos al sol, de tal mane-