

ble. Sin embargo, el cálculo demuestra que, para ciertas incidencias, los rayos emergentes forman un haz cilíndrico cuya intensidad continuará siendo la misma hasta regular distancia. Newton ha dado el nombre de *rayos eficaces* á los que poseen esta propiedad. Síguese de aquí

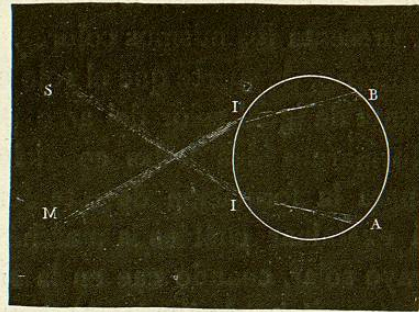


Fig. 201.—Marcha de los rayos eficaces después de dos reflexiones interiores

que todas las gotas de lluvia que se hallen en situación á propósito para enviar al ojo del observador sus rayos eficaces, parecerán más luminosas que las otras, y formarán en la nube una zona más brillante que las regiones vecinas.

Ahora conviene recordar que no poseen igual refrangibilidad los diferentes rayos coloreados de que se compone un haz de luz blanca. Las incidencias que corresponden á los rayos eficaces de cada color simple no son por tanto las mismas, de lo cual resulta que al salir el haz incidente de la esfera líquida se dividirá en tantos haces separados cuantos son los colores del espectro. Calculando los ángulos de incidencia para los rayos eficaces de los colores simples extremos, resulta, después de una sola reflexión interior:

Para los rayos morados, un ángulo de incidencia de $58^{\circ}40'$;

Para los rayos rojos, uno de $59^{\circ}23'$.

Y entónces, los ángulos que forman los rayos emergentes con la dirección de los incidentes son de $40^{\circ}17'$ para los rayos morados, y de $42^{\circ}2'$ para los rojos.

En caso de haber dos reflexiones interiores en A y en B, los ángulos de incidencia de los rayos eficaces son:

Para el morado, $71^{\circ}26'$; para el rojo, $71^{\circ}50'$; y las desviaciones sufridas por los rayos después de su emergencia de la esfera líquida, son de $50^{\circ}59'$ para los rayos rojos, y de $54^{\circ}9'$ para los morados.

Con estos datos, se puede demostrar que el arco-iris principal está formado por los rayos solares que han sufrido una sola reflexión en el interior de las esferas líquidas que componen las gotas de lluvia; y el arco-iris exterior por los rayos que han pasado por dos reflexiones sucesivas. Sea OZ una línea paralela á la dirección de los rayos solares, y que pasa por la vista del observador situado de espaldas al Sol. Mirando en la dirección Oa, dirección tal que hace que el ángulo aOZ sea el de la desviación de los rayos morados eficaces, llegará al ojo del observador un rayo morado procedente del rayo solar Sa que se ha reflejado una vez en las gotas de lluvia cuando al caer pasan sucesivamente por el punto a. En efecto, el paralelismo

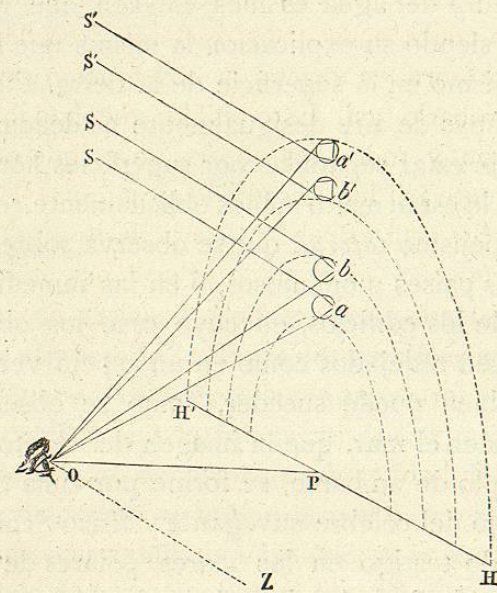


Fig. 202.—Teoría del arco-iris: arco principal y arco secundario

de las líneas OZ y Sa hace que sean iguales los ángulos SaO y aOZ; pero este último es también por hipótesis igual al ángulo de desviación que corresponde á los rayos eficaces morados. El rayo Sa encontrará pues una gota de lluvia cuya posición será la que conviene á la incidencia y á la emergencia calculadas, y el ojo verá un punto morado. Unos 2 grados más arriba, en b, verá un punto rojo, y en el espacio ab todos los matices del espectro comprendidos entre el rojo y el morado, esto es, el anaranjado, el amarillo, el verde, el azul y el añil. Pero ocurrirá lo propio indudablemente en cualquier otra dirección que forme con OZ los mismos ángulos acabados de indicar. El observador verá pues fajas de todos estos colores, proyectándose en el cielo en forma de círculos con-

céntricos que tienen su centro en la línea OZ, en un punto diametralmente opuesto al Sol.

Esto por lo que toca á los rayos solares que penetran en las gotas de lluvia y salen de ellas después de reflejarse una sola vez. Los que han sufrido dos reflexiones llegarán al ojo formando con la línea OZ ángulos de $50^{\circ}59'$ si son rayos rojos, y de $54^{\circ}9'$ si morados. Los rayos eficaces de los colores intermedios estarán comprendidos entre estos rayos extremos. Pero se ve que aquí el rojo está dentro y el morado fuera.

Todos estos resultados se deducen del cálculo en virtud de las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz, y dado el índice de refracción del agua. Ahora bien, las dimensiones angulares de cada arco-iris, la anchura de las zonas y la del intervalo que las separa son otras tantas consecuencias de los datos precedentes; y si la teoría es exacta, la observación deberá comprobarlo así. Esto es lo que han hecho Newton y todos los observadores que posteriormente á él han estudiado el arco-iris. Cuando el Sol está en el horizonte, la línea OZ se encuentra en este plano. Por consiguiente el centro de los arcos se halla á su vez en el horizonte y el arco-iris aparece en forma de semicírculo, forma con que efectivamente se presenta al salir ó al ponerse el Sol, al observador situado en la llanura. Con respecto á las alturas diferentes de la del astro, la amplitud del arco-iris no llega á la de una semi-circunferencia, siendo esta amplitud tanto menor cuanto más elevado aparece. Por último, si el observador estuviera situado en una montaña muy alta, y en un picacho angosto, podría ver más de una semi-circunferencia, y hasta un círculo completo, si llueve á regular distancia.

La teoría demuestra que puede haber rayos eficaces que correspondan á 3, 4 y 5 reflexiones sucesivas y por lo tanto se debería poder observar simultáneamente más de dos arco-iris.

El tercero y el cuarto se verían hácia el lado del Sol con diámetros de 39° y 45° . El quinto se observaría como los que hemos descrito, enfrente del astro solar. Mas al parecer no se ha notado ninguno de estos fenómenos indicado por la teoría, lo cual seguramente se explica por la disminución considerable de intensidad que sufre la luz después de reflejarse dos veces sucesivas.

Si la luz directa del Sol produce uno ó dos arco-iris concéntricos, la reflejada puede dar origen también al mismo fenómeno. La superficie de una agua tranquila, la del mar, la de un lago, al dar una imagen viva del Sol, han permitido observar dos ó cuatro arcos que teniendo centros diferentes en una misma vertical se cortan dos á dos por ser naturalmente más elevados los arcos que emanan del Sol reflejado.

No debe olvidarse que el arco-iris es un fenómeno cuya formación depende únicamente de la posición del observador con respecto al Sol y á la nube que se resuelve en lluvia; si el observador cambia de sitio, el arco-iris hace lo propio, y en su consecuencia, si dos personas situadas á gran distancia entre sí ven á la vez un arco-iris, no observan el mismo arco. Si así fuese, la que estuviese situada oblicuamente, lo vería en perspectiva, en forma de óvalo ó elipse, pero no de círculo. La teoría y la observación prueban de consuno la imposibilidad del hecho que acabamos de suponer. Muchas veces hemos oído asegurar á personas á quienes hablábamos de algún arco-iris, que ellas también lo habían visto, pero se equivocaban, á no ser que se hubieran hallado precisamente inmediatas al lugar en que nosotros estábamos en el mismo instante.

Quando el arco-iris ordinario es muy brillante se notan á veces fajas de colores, ya dentro del arco interior, ó ya fuera del exterior. Dáse á estas fajas el nombre de *arco-iris supernumerarios*, y Young, Arago, Babinet, y Airy han formulado su teoría, que, como la de las coronas, relacionan con la difracción de la luz.

IV

HALOS SOLARES—PARHELIOS, PARASELENES

En las regiones polares, y alguna que otra vez en las zonas templadas, se observa un fenómeno óptico bastante complicado, una reunión regular de círculos luminosos, de arcos tangentes á estos círculos que se forman alrededor del Sol, y lo mismo que el arco-iris, suelen presentar los varios colores del prisma.

Dáse el nombre de *halos* y de *parhelios* á estos fenómenos, que describiremos detalladamente.

Alrededor del Sol se forman dos círculos

concéntricos; el más pequeño llamado *halo menor* ó *halo interior*, tiene un radio de unos 22° á 23° ; el mayor, ó *halo exterior*, es casi exactamente doble, es decir, tiene 46° de radio. Uno y otro, bastante difusos en su contorno, brillan con los colores del arco-iris, pero en ambos está el rojo á la parte de dentro y el morado á la de fuera. Por lo comun, los colores del halo de 46° son más marcados que los del otro. Un tercer círculo, paralelo al horizonte á todo el cual da vuelta, corta los dos primeros pasando

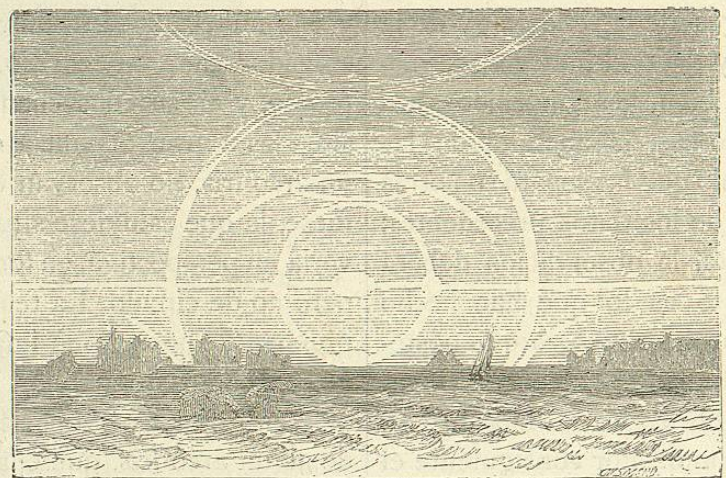


Fig. 203.—Halo solar, parhelios y círculo parhólico

halo interior y del círculo parhólico; son más raros y de colores más bajos en el halo exterior.

Aparte de esto, vense á veces arcos tangentes en los extremos superiores del diámetro vertical comun á los dos halos, arcos que tienen el zenit por polo, siendo por consiguiente paralelos al círculo parhólico, y estando coloreados como los dos halos. Por último, á veces sucede que aparecen otros arcos tangentes á cada lado de la parte inferior del halo de 46° , pero estos arcos laterales son sumamente raros.

Así como hay arco-iris nocturnos producidos por la luz de la Luna, también se ven *halos lunares*, que no difieren de los solares sino por su menor brillo ó por sus colores más bajos.

Aun cuando los halos sean más frecuentes de lo que se habia creído en un principio, con todo es muy raro que el fenómeno reuna todas las apariencias que acabamos de describir. Las observaciones más completas de que se hace mención en los tratados son las siguientes: halo completo observado por Lowitz en San Petersburgo el 29 de junio de 1790; otro halo completo observado por Hoff y Kries en Gotha

por su centro: dásele el nombre de *círculo parhólico*, y difiere de los halos en que no es de colores, sino de un matiz blanco difuso. Visto el círculo parhólico cerca de los otros dos, parece un diámetro rectilíneo y prolongado de ambos, y los corta en cuatro puntos en los cuales se ven apariencias más luminosas y como imágenes difusas del Sol, de los mismos colores que los halos y rojas como ellos hácia el lado del centro. Estos *parhelios* ó *falsos soles* aparecen con más frecuencia en la intersección del

el 12 de mayo de 1824; otro visto en Noruega el 27 de marzo de 1826 por Schult, Hansteen y Segelke, y por último el 4 de octubre de 1839, Bravais y Martins vieron y describieron un halo solar en Pitea (Suecia).

Demos ahora una sucinta explicación de estos singulares fenómenos. Huygens fué el primero que trató de formular la teoría del halo, suponiéndolo debido á ciertos glóbulos ó cilindros de hielo opaco rodeados de una capa de agua trasparente que hubiese en suspensión en la atmósfera. Mariotte y Venturi la explicaron á mediados del siglo anterior, atribuyéndola á la refracción de la luz en los cristales de nieve ó de hielo flotantes en el aire, cristales que existen en efecto y que por lo general son de forma prismática exagonal. Brewster, Arago, Fraunhofer y por fin Bravais, han aceptado y completado la teoría de Mariotte que basta para explicar todas las circunstancias del fenómeno.

Veamos ante todo cómo da cuenta del halo interior de 22° . La atmósfera está sembrada, entre el Sol y el ojo del observador, de una

muchedumbre de agujas prismáticas, que supondremos orientadas en todas direcciones. Dos caras laterales contiguas de uno de estos prismas forman entre sí un ángulo de 120° , ángulo demasiado grande para que algun rayo de luz pueda atravesarlas sucesivamente, por cuanto el que penetrara por una de ellas y cayera en el interior sobre la segunda, sufriría allí la reflexión total; pero no sucede lo propio con dos caras separadas por una tercera, porque entonces el ángulo es solamente de 60° . La luz que penetre en el prisma por una de estas caras y salga por la otra experimentará una desviación igual por lo ménos á $21^\circ 50'$ (ó sea 22°), ángulo de desviación mínima para un prisma de hielo cuyo ángulo es de 60° .

De todas las agujas prismáticas orientadas de todos modos, consideremos aquellas cuyo eje es perpendicular á un plano cualquiera que pase por el Sol y por el ojo del observador: estas agujas enviarán á dicho plano luz refractada procedente de todas direcciones. Pero en una de estas la luz será más intensa que en todas las demás; dirección que será la que corresponda á los prismas orientados de modo que den la desviación mínima, lo cual sucederá por dos razones. Primero porque los prismas así dispuestos pueden girar ligeramente sobre su eje sin que la desviación se modifique notablemente; lo cual equivale á suponer que los prismas orientados de este modo son más numerosos que los otros. Además, durante el movimiento de rotación de los otros prismas, los rayos refractados que envían al ojo no hacen más que pasar rápidamente, mientras que los refractados en el momento de la desviación mínima son cada vez más en número sin dejar de pasar por el ojo. Todos los rayos que, después de refractarse en las agujas de hielo, lleguen á nuestra vista, pero sufriendo ántes su mínima desviación, son los llamados *eficaces*, porque producen por sí solos círculos luminosos de colores que constituyen los halos. El mismo raciocinio es aplicable á todos los planos trazados por el Sol y por el ojo del observador, de suerte que todos los rayos eficaces formarán un cono, cuyo eje será la línea que reuna el ojo y el Sol.

Por consiguiente, se verá un círculo luminoso alrededor del astro solar á una distancia

angular igual á la que mide el ángulo de desviación mínima para prismas de 60° , es decir, á 22° de distancia, y será el *halo interior*.

En cuanto á la coloración del círculo, se explica con igual facilidad. Como sabemos, el índice de refracción va creciendo del rojo al morado, y por lo tanto, los rayos solares, des-

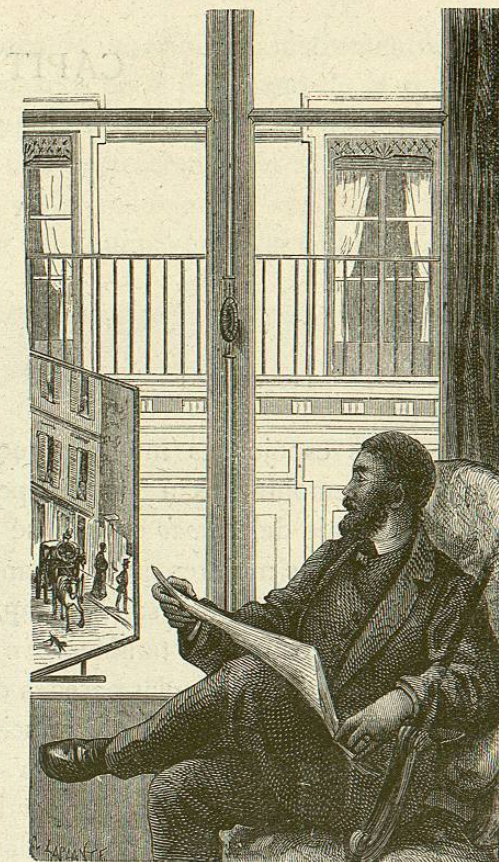


Fig. 204.—Espejo exterior ó espía

compuestos por la refracción prismática, no tienen el mismo ángulo de desviación mínima, sino que este ángulo crecerá con la refrangibilidad de los rayos. Así pues, el círculo rojo estará rodeado de círculos amarillo, verde, azul, etc., cuyo conjunto constituirá el halo menor ó interior.

Por lo que respecta al exterior ó de 46° , tiene por causa la refracción de los rayos solares que atraviesan los prismas de hielo al pasar de una cara lateral á uno de los exágonos de la base. Siendo de 90° el ángulo de estas caras, la desviación mínima de los rayos medios es de $45^\circ 44'$. De aquí resulta un círculo cuyo radio ó distancia angular al Sol es de unos 46° : es el *halo exterior*.