

# Sobre el origen del arco iris y del halo solar

MARIO E. RODRÍGUEZ RAMÍREZ

## RESUMEN

Se desarrolla la tesis, basada en la observación, de que en la formación del arco iris no son suficientes la presencia de la luz solar y las gotas de agua de la lluvia, sino que es indispensable también la presencia de capas de nubes altas o medias elevadas (formadas por cristales de hielo), situadas entre la fuente de la luz solar y la zona de lluvia donde se forma el arco iris, las cuales difractan y polarizan la luz solar. La hipótesis explica características fundamentales del arco iris que todavía no han sido explicadas satisfactoriamente. Los principios de la hipótesis se extienden a la explicación del origen del halo solar.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el trabajo se expone una nueva hipótesis sobre el origen del arco iris y del halo solar, basada en las analogías observadas con otros fenómenos ópticos similares, que tienen su explicación según principios de la óptica que pudieran ser aplicados a los casos del arco iris y del halo solar. Esta hipótesis no solamente se basa en la refracción, la reflexión, y las interferencias de la luz, sino también en la difracción y polarización de ella.

Las características principales del arco iris que deben ser explicadas por toda hipótesis son:

A. La presencia de las bandas de los colores del espectro de la luz solar en forma de arco circular en la zona de lluvia (Fig. 1, arriba).

B. El arco iris más frecuente es el llamado primario, el cual presenta la banda del color rojo en su zona exterior y la del violeta en la interior.

C. En ocasiones el arco iris primario aparece acompañado de un segundo arco iris, llamado secundario, concéntrico y exterior a él, más estrecho, con menor intensidad de luz que el primario y con el

---

Manuscrito aprobado el 15 de noviembre de 1984.

M. E. Rodríguez Ramírez pertenece al Instituto de Meteorología, de la Academia de Ciencias de Cuba.

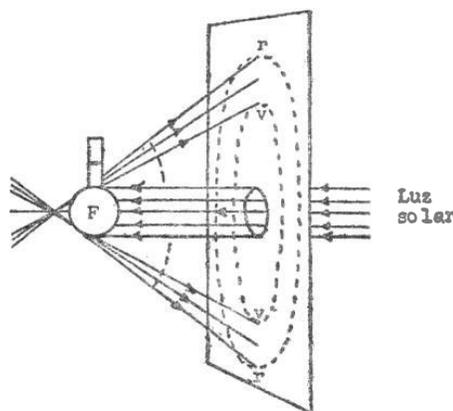


FIG. 1. Arriba: arco iris; abajo: experimento realizado por Theodorico (siglo XIV) y por Descartes (siglo XVII).

orden de los colores invertido (el rojo en la zona interior y el violeta en la exterior).

D. El área semicircular interior del arco iris primario, adyacente a la banda del color violeta, se presenta más iluminada que el área exterior adyacente a la banda del color rojo, la cual es relativamente oscura. Cuando el arco iris primario se presenta acompañado del secundario, la zona comprendida entre ellos aparece relativamente oscura comparada con la zona interior del primario y con la zona exterior adyacente al secundario. Esta banda oscura ha recibido el nombre de "Banda de Alejandro", porque fue estudiada por primera vez por el filósofo y matemático griego Alejandro de Afrodisias, en el siglo II n.e.

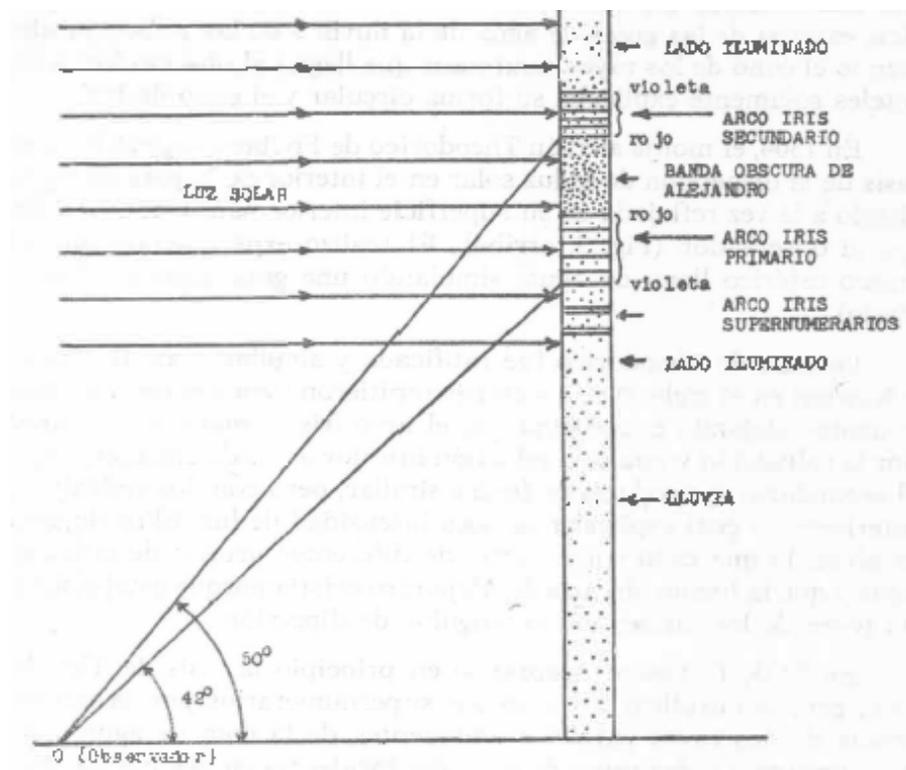


FIG. 2. Características del arco iris.

E. En la zona interior del arco iris primario, cerca de la banda violeta, a veces pueden distinguirse los estrechos y débiles arco iris supernumerarios, con los colores en el mismo orden del primario. Estos arco iris supernumerarios también pueden aparecer en la zona externa del secundario, con el orden de los colores igualmente invertido.

F. El ángulo comprendido entre la dirección de los rayos incidentes de la luz solar y la dirección de los rayos de luz emergentes de las gotas, y que llegan al observador en la superficie de la tierra, fue medido por Roger Bacon en el siglo XIII, obteniendo aproximadamente 42° para el arco iris primario y 50° para el secundario. En la actualidad, se usan los correspondientes ángulos suplementarios de 138° para el primario y de 130° para el secundario (Fig. 2).

## 2. ANTECEDENTES

La hipótesis más antigua sobre el origen del arco iris la formuló Aristóteles en el siglo IV a.n.e., según la cual este fenómeno se producía

por una reflexión especial de la luz solar descompuesta en la superficie externa de las gotas de agua de la lluvia y de las nubes, produciendo el cono de los rayos luminosos que llegan al observador. Aristóteles solamente explicaba su forma circular y el cono de luz.

En 1304, el monje alemán Theodorico de Freiberg sugirió la hipótesis de la dispersión de la luz solar en el interior de la gota de agua, siendo a la vez reflejada en su superficie interior para emerger y llegar al observador (Fig. 3, arriba). Él realizó experimentos con un frasco esférico lleno de agua, simulando una gota gigante (Fig. 1, abajo).

La tesis de Theodorico fue ratificada y ampliada por Descartes y Newton en el siglo XVII, los cuales repitieron y mejoraron los experimentos, dejando establecido que el arco iris primario se producía por la refracción y una sola reflexión interior antes de emerger, y que el secundario se producía en forma similar, pero con dos reflexiones interiores, lo cual explicaba su poca intensidad de luz. Ellos dejaron establecido que cada color partía de diferentes grupos de gotas de agua y que la banda oscura de Alejandro existía porque estaba situada fuera de los límites de los ángulos de dispersión.

En 1803, T. Young, aceptando en principio la tesis de Theodorico, propuso explicar los arco iris supernumerarios por la interferencia de dos rayos paralelos emergentes de la gota de agua, pero pertenecientes a dos rayos de luz solar incidentes en dos puntos diferentes de su superficie (Fig. 3, abajo); pero no pudo explicar la banda oscura de Alejandro.

Resumiendo, puede expresarse que en la actualidad prevalece, en lo fundamental, la teoría clásica de Theodorico, Descartes, y Newton, con las contribuciones mencionadas de Young y otros. Y ninguna de estas tesis aisladas ha sido capaz por sí sola de explicar la totalidad o la mayoría de las características fundamentales del arco iris.

Los argumentos en que se basa la teoría actual, compleja, sobre el origen del arco iris, presenta muchos puntos poco consistentes:

A. La luz blanca solar incidente en la superficie de la gota de agua no llega en forma de fino haz de pequeño diámetro en comparación con el de la gota de agua, para evitar la recomposición de la luz blanca al interferir los rayos emergentes. Esta condición es requerida en el experimento de la dispersión de la luz solar a través de un prisma en la cámara oscura, como el realizado por Newton (Fig. 4, arriba).

B. El ángulo que forma la dirección de los rayos de la luz solar reflejada en la superficie externa de la gota de lluvia y que llega al observador en la superficie de la tierra, con la dirección de los rayos

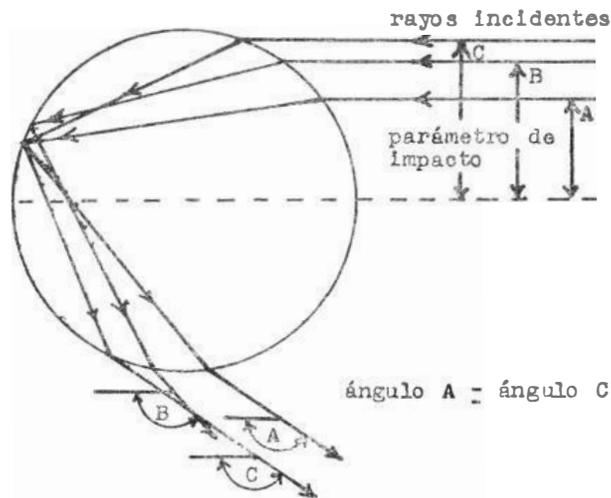
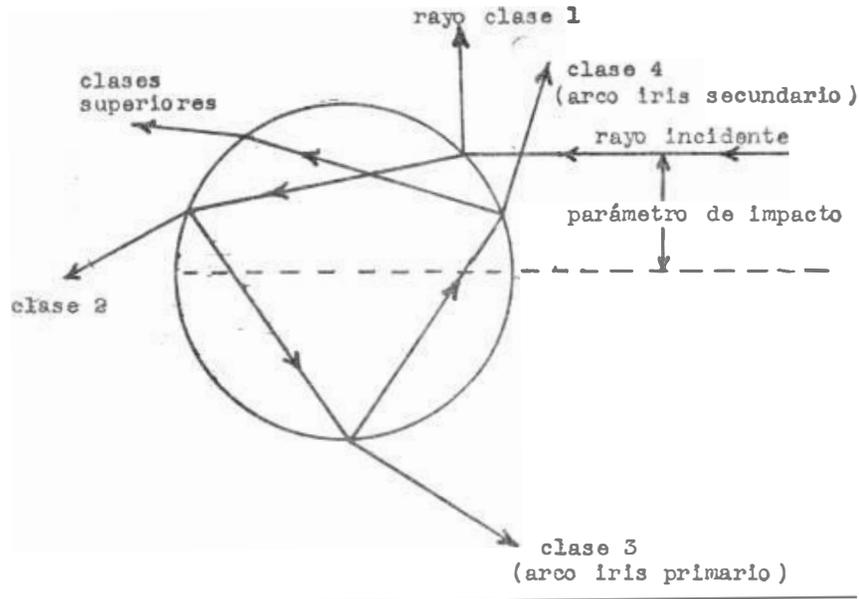


FIG. 3. Arriba: teoría de la dispersión en la gota de agua, de Theodorico de Freiberg, desarrollada por Descartes y Newton; abajo: tesis de la interferencia de los rayos paralelos, de T. Young, para explicar los arco iris supernumerarios.

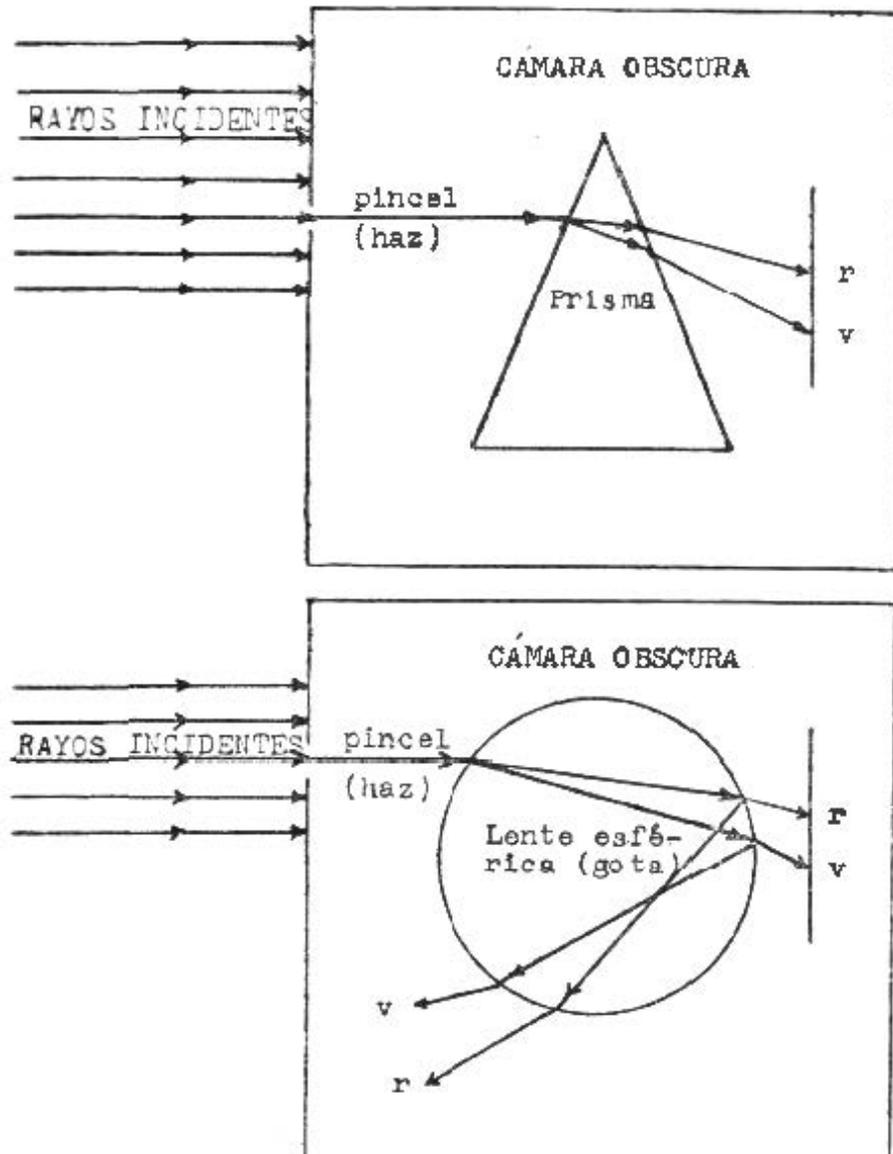


FIG. 4. Arriba: condiciones para la dispersión en el prisma; abajo: en la gota de agua (lente esférica).

emergentes después de refractados y reflejados en el interior de la gota, los cuales también llegan al observador (Fig. 5), es muy pequeño, debido al diámetro de la gota y a la distancia a que se encuentra. Y por ello el punto de incidencia del rayo reflejado en la superficie externa de la gota no puede ser separado, a la vista del observador, del punto de salida del rayo refractado y reflejado en su interior.

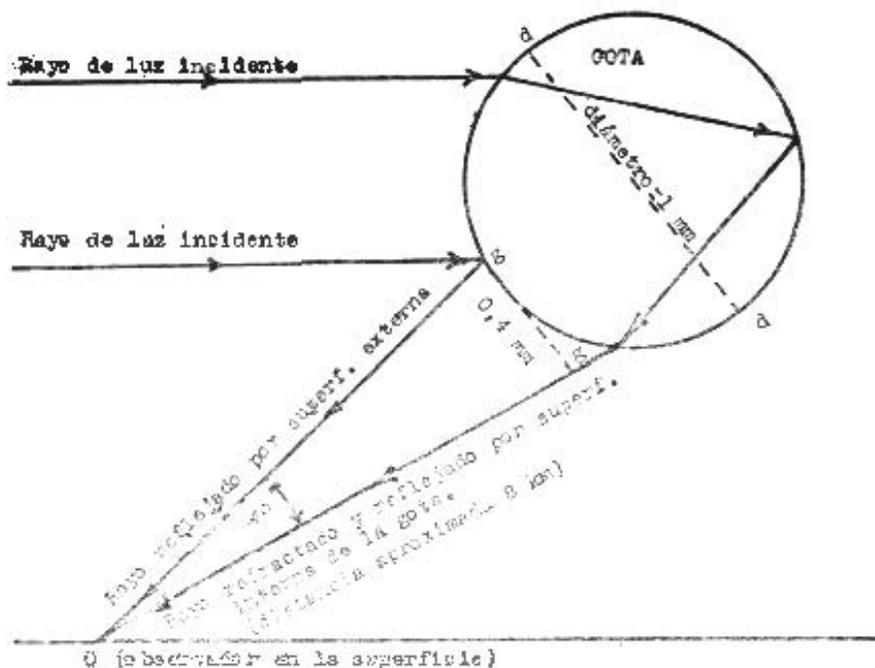


FIG. 5. Ángulo formado por el rayo reflejado en la superficie de la gota y el rayo refractado y reflejado por la superficie interna.

Veamos un ejemplo: supongamos un arco iris formado en una zona de lluvia situada a unos 8 km de distancia del observador y que las gotas de la lluvia tienen un diámetro medio de 1 mm. Entonces, en la Fig. 5 se tiene:

$$\tan A = \frac{0,4 \text{ (mm)}}{8 \times 10^6 \text{ (mm)}} - \frac{1}{2 \times 10^7}$$

que corresponde aproximadamente a un ángulo 10 000 veces más pequeño que el ángulo de 6', que es aproximadamente el ángulo medio del poder separador del ojo humano. Y, por lo tanto, el observador recibiría esos dos rayos de luz como pertenecientes a un foco común en la superficie de la gota de agua. Y, por otra parte, la intensidad de la luz del rayo reflejado en la superficie exterior de la gota, y que llega al observador, debe ser mucho mayor que la del rayo refractado y reflejado en el interior de la gota (rayo clase 3), el que también llega al observador, debido a las pérdidas en intensidad de luz de los rayos clase 1 y clase 2 (Fig. 3, arriba). Esto permite suponer que el rayo de luz blanca solar reflejado en la superficie externa de la gota debe predominar sobre los rayos refractados y reflejados en el

interior de la gota, al ser recibidos por el observador como partiendo de un mismo foco puntual. Este análisis puede ser aplicado con mayor razón al arco iris secundario, cuya luz es menos intensa que la del primario, según la teoría clásica.

C. Las hipótesis de Descartes, de Newton, y de Young no han podido ofrecer una explicación convincente de la existencia de la banda oscura de Alejandro. Aun aceptando que en esa zona no se puede originar el arco iris, ellas no han podido explicar el proceso en virtud del cual la intensidad de la luz blanca solar incidente disminuye tan notablemente. Todo parece indicar que el oscurecimiento en la banda de Alejandro se debe a causas externas a la zona de lluvia.

D. Ninguna teoría ha podido explicar las causas por las que, estando presentes los dos factores fundamentales requeridos por la teoría clásica predominante (la luz solar y la zona de nubes y lluvias), son muy pocos los casos en que se forma el arco iris. Y esto conduce a suponer que al menos se requiere la presencia de un tercer factor para su formación.

### 3. FUNDAMENTACIÓN

El autor se ha basado en la observación de fenómenos ópticos similares, que tienen su explicación si se toma en consideración los fenómenos de la difracción y la polarización de la luz solar. Estos fenómenos son los siguientes:

A. Proyección de la sombra del cuerpo de un avión en vuelo sobre la superficie de capas de nubes a más bajo nivel, inscrita en una corona de difracción que presenta los colores del espectro solar con el rojo en su exterior y el violeta en su interior. En algunos casos, en ausencia de capas de nubes, se ha podido observar la sombra del avión y la corona proyectadas sobre los campos de cultivo en la superficie de la tierra.

B. Presencia de capas de nubes altas del tipo de *cirrostratus densus*, constituidas por cristales de hielo, o de capas de nubes medias elevadas del tipo de *altostratus*, constituidas por gotas de agua y cristales de hielo, que interceptan y difractan los rayos de luz solar que se proyectan sobre la zona de nubes y lluvias en la cual se ha formado el arco iris.

C. La no formación de arco iris en todos los casos observados, en los cuales estaban presentes las nubes y lluvias aparentemente adecuadas, y la luz solar proyectada sobre ellas sin la intercepción de capas de nubes altas o medias.

D. Fenómeno de la difracción de la luz solar interceptada por las capas de *cirrostratus densus* o *altostratus*, y proyectada sobre la superficie (sobre la vegetación y edificios) en la zona del observador.

#### 4. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

En el modelo aquí propuesto para la formación de arco iris se establece que es indispensable la presencia de un tercer factor, consistente en capas de nubes altas del tipo *cirrostratus densus* (constituidas por cristales de hielo) o de nubes medias elevadas del tipo *altostratus* (gotas de agua y cristales de hielo), llamadas aquí los difractores, situadas entre el sol (llamado aquí la fuente de luz) y la zona de nubes y lluvia (llamada aquí la pantalla), y las cuales contribuyen a la formación del haz de luz solar que se difracta en los bordes de esas capas de nubes o en los orificios formados en ellas, proyectando las bandas cromáticas sobre las gotas de agua en la zona de lluvia, las cuales son reflejadas por las superficies externas e internas de las gotas, hacia el observador.

En este modelo se le asigna al fenómeno de la difracción de la luz solar una participación fundamental en los procesos de la formación del arco iris, junto a los ya establecidos fenómenos de la refracción, la reflexión, y las interferencias de la luz solar. También es posible que la polarización de la luz desempeñe un papel importante.

En la Fig. 6 (arriba, izquierda y derecha) se representan, respectivamente, los procesos de difracción de un haz de luz blanca al rozar los bordes de un obstáculo y al rozar los bordes de un orificio en un obstáculo. En la de la izquierda se puede observar sobre la línea que representa la pantalla, las zonas iluminadas no difractadas, i-i, las zonas relativamente oscuras, i-r, y la zona del haz difractado, r-v, con el color rojo hacia el exterior y el violeta hacia el interior. En la de la derecha se puede observar en la línea de la pantalla la zona central iluminada no difractada, i-i, las zonas relativamente oscuras, i-r, y los haces difractados, r-v, con el color rojo hacia el interior y el violeta hacia el exterior. También puede observarse que en la de la izquierda el haz difractado se inclina hacia el interior y que en la de la derecha el haz difractado se inclina hacia el exterior.

La Fig. 7 (arriba) presenta uno de los posibles casos teóricos del modelo de la hipótesis. En ella puede observarse el cañón del haz de luz solar formado entre capas de nubes altas y los difractores formados también por capas de nubes que realizan la función de la difracción periférica en los bordes de ellas, y la de la difracción en

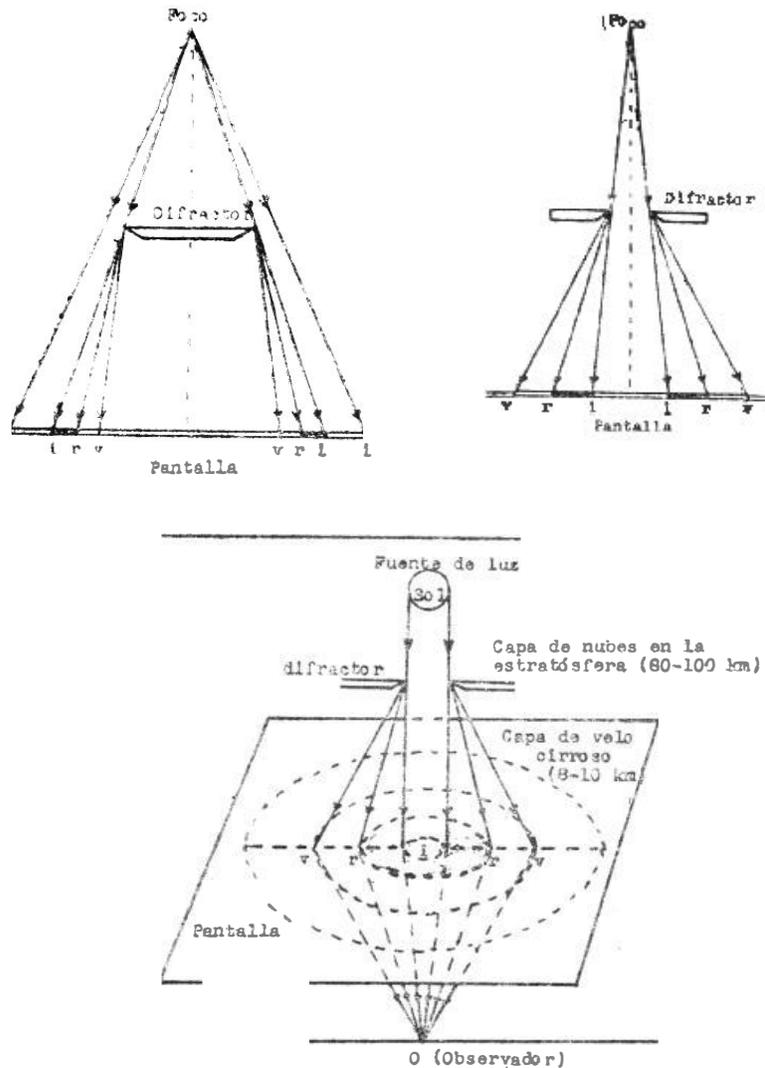


FIG. 6. Fenómenos de difracción. Arriba: en la periferia (izquierda); por un orificio (derecha). Abajo: caso del halo solar.

los bordes de los orificios, produciéndose las dos bandas de difracción con el orden de los colores invertido; quedando la zona de obscuridad relativa entre ellas y las dos zonas iluminadas externas en las cuales se originan las estrechas zonas supernumerarias de interferencias. La figura de abajo representa uno de los posibles casos reales, según el modelo teórico. En ella se observan el cañón del haz de los rayos de luz solar, los elementos difractores constituidos por nubes altas, y la pantalla en donde se ven los arco iris primario,

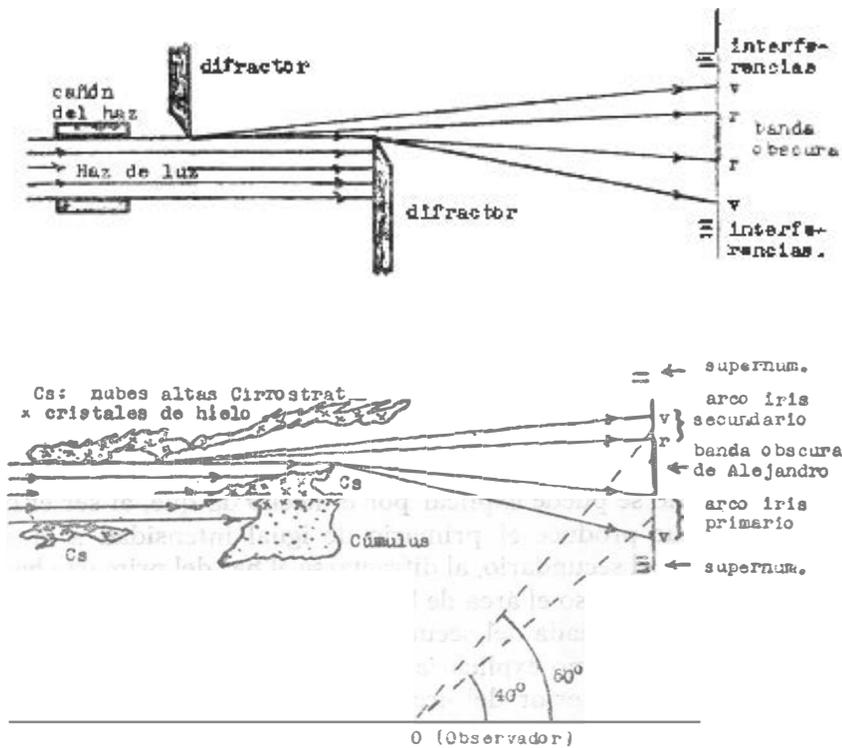


FIG. 7. Arriba: uno de los modelos posibles de formación del arco iris; abajo: casos reales observados.

secundario, y supernumerarios, y el área entre el primario y el secundario que constituye la banda oscura de Alejandro.

El modelo propuesto puede explicar las características del arco iris como sigue (Figs. 1 arriba, 2, y 7):

A. El arco iris primario puede ser originado por la difracción y polarización del haz de luz en el borde de una capa de nubes *cirrostratus densus* o *altostratus*, que llega ya descompuesto en los colores a las gotas de agua de la pantalla en donde son reflejados al observador. Este mecanismo explicaría el orden de los colores, con el rojo en el exterior, el violeta en el interior, la banda oscura de Alejandro adyacente al color rojo (zona del infrarrojo), así como las posibles interferencias en la zona iluminada adyacente al color violeta para originar los arcos supernumerarios.

B. El arco iris secundario puede ser originado por el mismo principio por la difracción del haz de luz en el borde de un orificio creado en una capa de nubes *cirrostratus densus* o *altostratus*, llegando la luz ya descompuesta a las gotas de agua para ser reflejadas al observador. Este mecanismo explicaría la inversión del orden de los colores en el secundario, con el rojo en el interior y el violeta en el exterior, la banda oscura de Alejandro (zona del infrarrojo) entre los dos arco iris, y las posibles interferencias en la zona iluminada adyacente al violeta, que originan los arco iris supernumerarios del secundario.

Los mecanismos ópticos expuestos en los puntos A y B anteriores —cuando existen las condiciones adecuadas de la fuente de luz, la pantalla de lluvias y las nubes difractoras para originar simultáneamente los arco iris primario y secundario— explican que este último esté más alto en el horizonte que el primario y que la banda oscura de Alejandro esté situada entre los dos arco iris (entre las respectivas bandas rojas-zona del infrarrojo).

C. La poca intensidad de luz del arco iris secundario respecto a la del primario se puede explicar por el hecho de que, al ser el haz de luz solar que produce el primario de igual intensidad a la del haz que produce el secundario, al difractarse el haz del primario hacia el eje del cono luminoso el área de la zona iluminada es menor que el área de la zona iluminada del secundario al difractarse hacia afuera del eje. Este mecanismo explicaría, a la vez, la brillantez observada en el área circular interior del arco iris primario.

D. La explicación de los ángulos de  $42^\circ$  para el arco iris primario y de  $50^\circ$  para el secundario (ambos medidos en la zona del rojo) es uno de los puntos más difíciles para la hipótesis que presentamos. Sin embargo, como esos ángulos tienen diferentes valores para cada rayo monocromático, y dependen de sus ángulos de refracción en la gota de agua, ellos son independientes del hecho de que el rayo monocromático incida aislado en la superficie de la gota de agua (que llegue ya separado) o que llegue integrado en la luz blanca incidente. Por eso en esta hipótesis se consideran esos ángulos como la condición para la observación del arco iris. Y en el caso de que la luz llegue ya dispersada a las gotas de agua, como se supone que el punto de incidencia del rayo monocromático que es reflejando en la superficie externa de la gota y el punto de salida del rayo emergente refractado prácticamente coinciden, sus intensidades se sumarán como en un solo rayo, cuyo ángulo dependerá de los ángulos de refracción de los rayos monocromáticos solamente, ya que para cada punto de emergencia de los rayos refractados en la gota existirá un punto de reflexión asociado en la superficie externa.

## 5. EXTENSIÓN DE LA HIPÓTESIS AL ORIGEN DEL HALO SOLAR

Basada en el mismo principio de las analogías entre muchos fenómenos de la naturaleza, la hipótesis presentada para el origen del arco iris se puede aplicar a la formación del halo solar.

El halo solar presenta las bandas de los colores del espectro de la luz solar en forma circular, proyectadas sobre una capa de nubes altas del tipo de *cirrus nebulosus* (velo cirroso), con la banda del color rojo en su borde interior y la del violeta en el exterior. Pre-



**FIG. 8.** Halo solar. Se observa la imagen central brillante del sol, la corona oscura (análoga a la banda oscura de Alejandro, en el arco iris), y la banda cromática circular externa del halo.

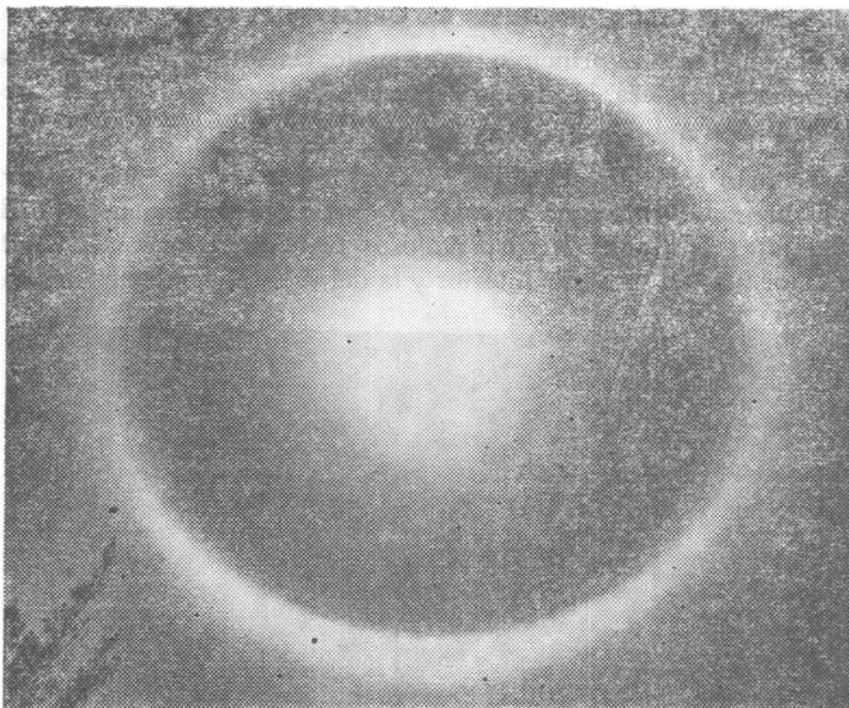


FIG. 9. Notable halo solar observado en la Ciudad de La Habana a las 15:30 h (de verano), (19:30 hG), el día 3 de mayo de 1986. Foto tomada en el Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba, por Antonio del Cristo, Jefe del Dept. Fotografía.

senta la imagen brillante del sol en su región central, bien definida, y una zona circular oscura entre la imagen del sol y la banda de color rojo, muy similar a la banda oscura de Alejandro en el arco iris (Figs. 8 y 9).

En la teoría clásica del origen del halo solar, la cual prevalece en la actualidad, se establece que solamente son indispensables dos factores o elementos fundamentales para su formación: la luz proveniente del sol y la capa de nubes *cirrus nebulosus* (constituida por cristales de hielo del sistema exagonal). Esta teoría supone que el espectro luminoso circular del halo se forma por la refracción y reflexión de los rayos luminosos en el interior de los prismas exagonales de los cristales de hielo que constituyen el velo cirroso. Esta teoría es análoga a la teoría clásica de la formación del arco iris. Y como ha ocurrido con la teoría del arco iris, la teoría clásica del halo mencionada no ha podido explicar satisfactoriamente algunas características fundamentales de él, como la gran corona oscura entre la brillante imagen del sol y la corona cromática, análoga a la

banda oscura de Alejandro en el arco iris. Tampoco ha podido explicar el hecho de que no siempre que están presentes la fuente de la luz solar y la capa de nubes altas del tipo de *cirrus nebulosus* o velo cirroso, se produce el halo, lo cual lleva a pensar que en este caso también es indispensable, al menos, la presencia de un tercer factor.

Ya que el halo solar presenta en su región central la nítida y brillante imagen del sol y la amplia corona cromática con los colores del espectro en el mismo orden que presenta el arco iris secundario (rojo en el interior y violeta en el exterior), su origen puede ser explicado en forma análoga al del arco iris secundario, debido a la difracción de la luz solar en los bordes de un orificio en las capas de nubes de la alta atmósfera (zona de la estratósfera), como la capa de las nubes noctilucèntes, entre los 80 y 100 km de altura (u otras nubes), constituidas principalmente por polvo y cristales de hielo en una zona fría con temperaturas de 180 a 200 grados absolutos (zona de inversión de temperaturas), proyectándose los haces de la luz solar difractada sobre la capa de nubes altas de la tropósfera, del tipo *cirrus nebulosus* o velo cirroso, que hace las veces de una pantalla translúcida, que permite observar el fenómeno desde la superficie de la tierra (Fig. 6, abajo).

## 6. CONCLUSIONES

- A) La hipótesis propuesta plantea un nuevo enfoque del origen del arco iris y del halo solar, al considerar nuevos factores en sus procesos, y por ello es necesario organizar sus observaciones sistemáticas desde la superficie de la tierra en las estaciones meteorológicas, anotando sus características y estructura y el comportamiento de las variables y factores que se suponen fundamentales. También pueden hacerse observaciones ocasionales, en aviones de reconocimiento dotados de una pequeña cámara oscura, con el fin de interceptar la supuesta banda cromática en la altura proyectada desde las nubes difractorias hacia la zona del arco iris. Y magníficas observaciones pueden ser realizadas desde los satélites artificiales.
- B) Se deben iniciar los estudios experimentales y teóricos del arco iris y del halo solar en un pequeño laboratorio, con el fin de tratar de comprobar la tesis planteada, prestando gran atención a los fenómenos de la refracción, la reflexión, la difracción, y la polarización de la luz solar, tanto en los elementos difractores (nubes) de ambos fenómenos como en las zonas de lluvias, en las bandas cromáticas, en la zona oscura de Alejandro en el arco iris y en la corona oscura del halo, así como en las características de las capas de nubes en todo el horizonte alrededor del centro de obser-

vacación. El laboratorio debe estar dotado de los instrumentos y equipos ópticos adecuados.

- C) El modelo propuesto ha permitido al autor pronosticar, por primera vez, la formación y la disipación del arco iris, calculando aproximadamente el movimiento del elemento difractor (nubes), en las condiciones típicas de la teoría clásica.
- D) A juicio del autor, es posible que las condiciones de las teorías clásicas del arco iris y del halo solar no sean las fundamentales por sí solas, pero sí concomitantes y necesarias para la observación de los meteoros analizados.

### REFERENCIAS

HUMPHREYS, W. J. (1964): *Physics of the air*. Dover, Nueva York, 676 pp.

NUSSENZVEIG, H. M. (1977): The theory of the rainbow. *Scient. Amer.*, 276:4.



### ON THE ORIGIN OF THE RAINBOW AND OF THE SOLAR HALO

#### ABSTRACT

Based on observation, the following thesis is postulated: the formation of the rainbow implies necessarily not only sunlight and rain drops, but also the presence of relatively high layers of clouds (formed by ice crystals) between the source of light and the zone where the rainbow is formed, whereby sunlight is diffracted and polarized. The hypothesis clarifies fundamental characteristics of the rainbow which have not been as yet satisfactorily explained. The principles of the hypothesis are made extensive to the explanation of the origin of the solar halo as well.