



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

MEMORIA TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO

La magia de la óptica en nuestra
atmósfera: arcoíris, espejismos y halos.

Presentado por Inés Guerra Fernández

Tutelado por: Carlos Toledano Olmeda

Tipo de TFG: Revisión

En Valladolid a, 24/06/2025

ÍNDICE

Introducción	3
Reflexión	3
Refracción.....	3
Difracción.....	4
Óptica atmosférica	4
Fenómenos de refracción	5
Arcoíris.....	5
Halos	9
Espejismos	12
Fenómenos de difracción	14
Corona.....	15
Espectro de Brocken (gloria)	17
Arcos supernumerarios.....	19
Conclusiones	20
Bibliografía	21

Introducción

La curiosidad del ser humano por el cielo ha estado presente a lo largo de toda la historia. Muchos de los fenómenos ópticos que se producen en la atmósfera han sido el origen de relatos mitológicos, leyendas (como el barco fantasma del Holandés Errante [1]), supersticiones e incluso símbolos divinos (como los halos de los santos en diferentes pinturas e incluso estatuas), antes de que la ciencia encontrase una explicación racional.

Gracias a los avances en la óptica física y meteorología, somos capaces de explicar estos fenómenos que parecen casi magia con la interacción de la luz solar con los diferentes elementos de la atmósfera: gotas de agua, cristales de hielo o las diferentes capas de aire con distinta temperatura. Para poder comprender cómo se forman, debemos entender tres propiedades fundamentales del comportamiento de la luz al propagarse: reflexión, refracción y difracción.

Reflexión

La ley de la reflexión [2] dice que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, y, además, los dos rayos (incidente y reflejado) y la normal a la superficie están en un plano común (imagen 1).

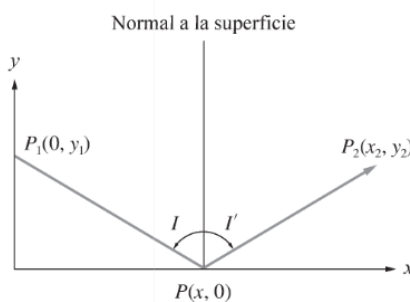


Imagen 1: Ilustración de un rayo (P_1) incidente siendo reflejado (P_2) por el eje x. Imagen extraída de D. M., Óptica básica [2].

Refracción

Para entender la refracción primero debemos conocer el concepto de “índice de refracción” [2]. La velocidad de la luz cambia dependiendo del medio por el que viaje. En el vacío es donde alcanza su velocidad máxima (300.000 km/s). El índice de refracción de un medio se define como:

$$n = \frac{c}{v}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio con índice de refracción n .

La refracción sigue la ley de Snell:

$$n \sen I = n' \sen I'$$

donde n es el índice de refracción de la primera superficie, I el ángulo de incidencia, n' el índice de refracción de la segunda superficie y I' el ángulo de refracción (imagen 2).

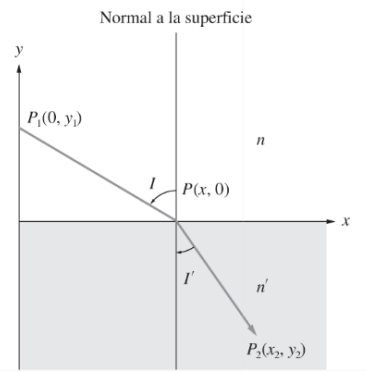


Imagen 2: Ilustración de un rayo incidente (P_1) siendo refractado (P_2) al atravesar el eje x . Imagen extraída de D. M., Óptica básica [2].

Difracción

La difracción de la luz es un fenómeno ondulatorio que se manifiesta cuando una onda electromagnética incide sobre un borde, rendija u obstáculo cuyo tamaño es del orden de su longitud de onda [3, 4]. Según el principio de Huygens-Fresnel, cada punto de una onda incidente actúa como fuente secundaria de nuevas ondas. La superposición de estas ondas secundarias genera un patrón de interferencia característico, con zonas de máxima y mínima intensidad, que depende de la forma del obstáculo (imagen 3).

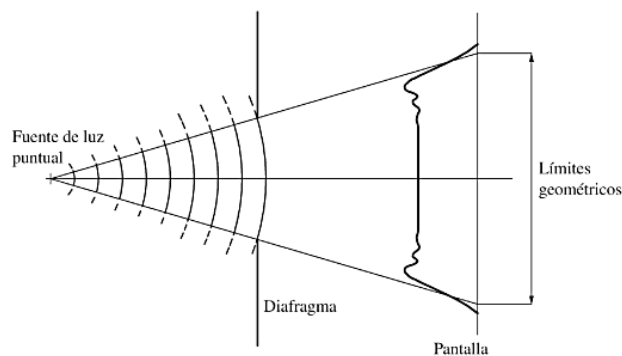


Imagen 3: Difracción de la luz por diafragma. Imagen extraída de D. M., Óptica básica [2].

Óptica atmosférica

La Óptica Atmosférica se dedica al estudio de la interacción de la luz (principalmente la radiación solar) con la atmósfera. Esto incluye, además de los fenómenos ya mencionados, la dispersión (o, del inglés, *scattering*) por parte de gases, nubes y partículas, responsable por ejemplo del color azul del cielo, y la absorción de radiación por parte de gases atmosféricos (vapor de agua, ozono) y demás componentes. También se producen fenómenos de emisión debido a la radiación de alta energía que llega a las capas altas de la atmósfera, formándose las auroras boreales.

Aunque estas manifestaciones puedan parecerse a simple vista, cada una de ellas se forma bajo condiciones físicas específicas y se producen por las diferentes propiedades de la luz solar. Por ello podemos dividir estos fenómenos ópticos atmosféricos en:

- Fenómenos de refracción.
- Fenómenos de difracción.
- Fenómenos de percepción.

Este trabajo tiene como objetivo principal describir algunos de los fenómenos visuales más llamativos, centrándose en los fenómenos de refracción y difracción, cuya explicación queda dentro de la óptica estudiada en la titulación de Óptica y Optometría. Aunque no se incidirá sobre los fenómenos de percepción, existen algunos de gran interés como el *Sun and Moon size*, que consiste en el aumento de tamaño aparente del Sol o la luna que percibimos cuando se encuentran cerca del horizonte (realmente el tamaño angular no varía, pero el cerebro tiene una percepción diferente a la realidad). Mediante esta clasificación se pretende comprender los principios físicos de estos fenómenos, además de sus condiciones de aparición y la evolución histórica de su interpretación.

Fenómenos de refracción

La refracción es uno de los fenómenos ópticos fundamentales en la formación de muchos efectos atmosféricos. El comportamiento de los rayos de luz al atravesar diferentes medios como gotas de agua, cristales de hielo y el aire de la atmósfera puede dar lugar a efectos visuales sorprendentes, siendo la refracción la base de la explicación de fenómenos atmosféricos tan conocidos como el arcoíris, los halos o los espejismos.

Arcoíris

El arcoíris es uno de los fenómenos ópticos atmosféricos que más ha llamado la atención a lo largo de la historia. El filósofo griego Aristóteles fue probablemente el primero en tratar de entender la formación del arcoíris [5]. Propuso que se trataba de una reflexión especial de la luz solar por las nubes con un ángulo fijo para formar un cono circular de “rayos de arcoíris”.

Esta hipótesis fue rechazada en 1304 por el monje alemán Teodorico de Freiberg al proponer que cada gota de agua podía formar un arcoíris; no era necesario una nube como sugería Aristóteles. Esta teoría la comprobó con experimentos con un frasco esférico de vidrio lleno de agua, simulando una gota aumentada.

La teoría de Teodorico fue ignorada hasta tres siglos después, cuando Descartes realizó los mismos experimentos, con los que se demostraron las características principales de los arcoíris.

Los principios fundamentales que explican la formación del arcoíris son la reflexión, la refracción y la dispersión cromática [5]. La dispersión cromática es una consecuencia de la refracción. Gracias a Newton y sus experimentos con prismas en 1666, se demostró que la luz solar está compuesta por luz de diferentes longitudes de onda, cada una correspondiente a un color: las más cortas que equivalen al violeta, unos 380 nanómetros, y las más largas al rojo, unos 750 nanómetros. Esto es importante para la formación del arcoíris porque el agua tiene un índice de refracción ligeramente distinto para cada longitud de onda (dispersión cromática), así que el ángulo de refracción de un rayo solar difiere ligeramente para cada color (imagen 4).

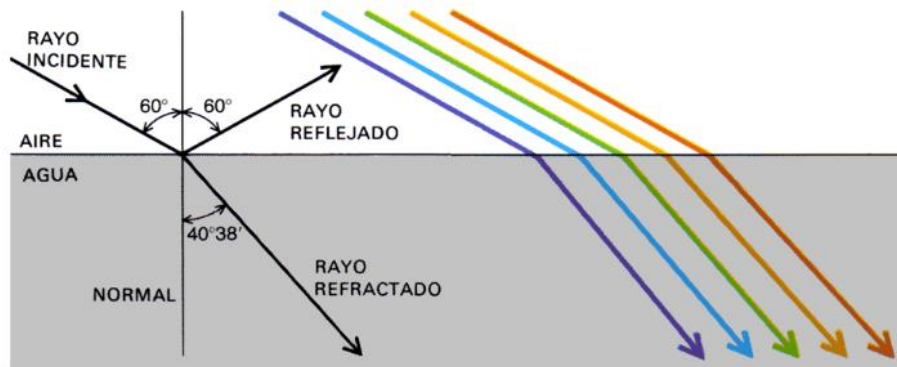


Imagen 4: Ilustración que muestra la ley de la reflexión, la ley de la refracción y los diferentes componentes cromáticos de la luz solar. Imagen extraída de H. M., Teoría del arco iris [5].

Cuando un rayo de luz Solar incide sobre una gota de agua, parte de la luz se refleja (esta luz reflejada se denomina “rayos de primer orden”) y la otra parte se refracta en el interior [5]. La luz refractada vuelve a sufrir una reflexión y refracción parciales al encontrarse de nuevo con la superficie de la gota. En este caso es la luz refractada la que se denomina “rayos de segundo orden” porque es la que sale de la gota. Una vez más, los rayos reflejados se encuentran con la superficie de la gota y se refractan y reflejan parcialmente, repitiéndose este proceso para formar rayos de tercer orden, cuarto orden (imagen 5) ... Se podría decir que este proceso continúa infinitamente, pero hay que tener en cuenta que la luz va perdiendo cada vez más intensidad con cada reflexión, de acuerdo con las fórmulas de Fresnel, así que llega un momento en el que la luz es demasiado tenue como para percibirla. Aproximadamente en cada reflexión hay solo el 2% de la intensidad incidente.

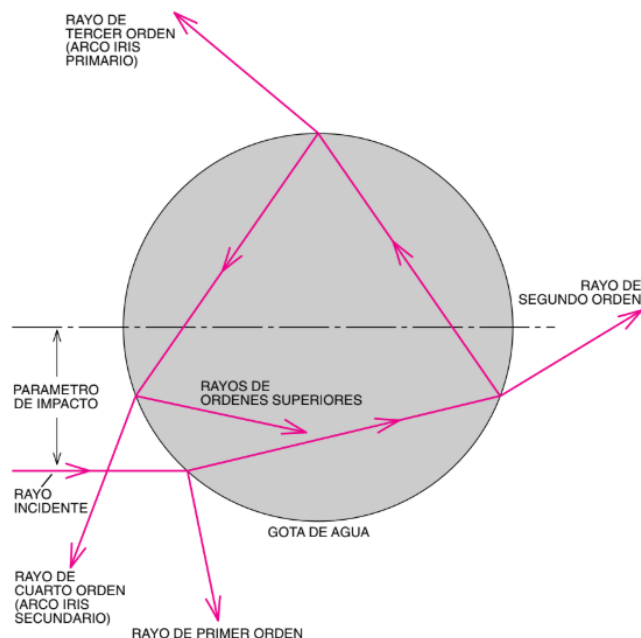


Imagen 5: Ilustración que muestra el recorrido de un rayo de luz al incidir sobre una gota esférica. Imagen extraída de: H. M., Teoría del arco iris [5].

El arcoíris que nosotros vemos con mayor intensidad (arcoíris primario) está formado por los rayos de tercer orden; para poder observar los rayos de primer y segundo orden deberíamos tener el Sol de frente, no permitiéndonos verlos por el deslumbramiento. Newton aseguró la existencia del arcoíris de orden cero [9], sin embargo, hay estudios que demuestran que la causa de la imposibilidad para verlo no es el deslumbramiento, sino su no existencia al no producirse en ese caso la dispersión cromática.

Además, por encima del arcoíris primario existe un arcoíris secundario que no siempre conseguimos ver, pero sí existe (imagen 6). Este está formado por los rayos de cuarto orden, que han sufrido dos reflexiones internas, y, por lo tanto, los colores aparecen en orden inverso. Es más difícil de ver porque su intensidad es menor al haber sufrido una reflexión más que el primario y como consecuencia ha perdido parte de luz refractada.

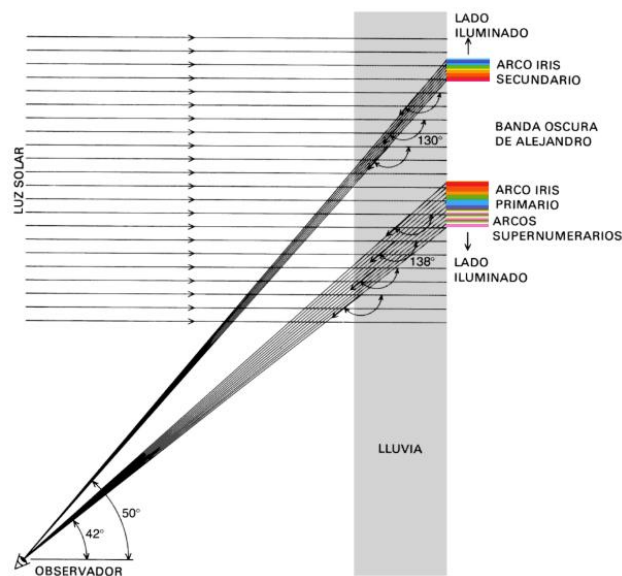


Imagen 6: Ilustración que muestra los ángulos de desviación mínima del arcoíris primario y secundario junto con la distribución de sus diferentes componentes cromáticas. Imagen extraída de: H. M., Teoría del arco iris [5].

El tamaño de las gotas no influye en el ángulo del arcoíris. Como la forma y el índice de refracción es siempre el mismo al ser gotas de agua, solo queda una variable importante: el parámetro de impacto. El parámetro de impacto es la distancia entre el rayo incidente y el eje paralelo a él que pase por el centro de la gota: su valor varía de 0 (cuando el rayo pasa por el eje central) al radio de la gota (cuando el rayo es tangente a la superficie).

Cuanto mayor es el parámetro de impacto, menor es el ángulo de desviación (imagen 7). Sin embargo, Descartes observó que el ángulo de desviación alcanza un mínimo cuando el parámetro de impacto es aproximadamente $7/8$ del radio de la gota, y después aumenta de nuevo, aunque se aumente parámetro de impacto; el ángulo de desviación mínima para los rayos de tercer orden es $\approx 138^\circ$.

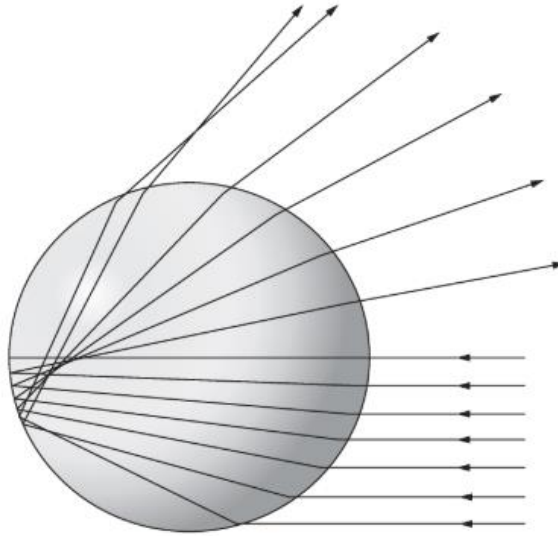


Imagen 7: Ilustración del recorrido de varios rayos paralelos al incidir sobre una gota de agua esférica. Imagen extraída de D. M., Óptica básica [8].

Esto explica por qué, aunque el Sol incida sobre las gotas en todos los posibles parámetros de impacto, la región del arcoíris se ve con más intensidad: la variación del ángulo de desviación disminuye a medida que se acerca al ángulo de desviación mínima, lo que produce un aumento en la intensidad de esa región al acumularse más cantidad de rayos [8]. Es importante tener en cuenta que, como se mencionó anteriormente, el ángulo de desviación para cada longitud de onda es ligeramente distinto, así que el ángulo de desviación mínima también. Esto es lo que provoca que veamos los diferentes colores: cada color tiene su máximo de intensidad en su ángulo de desviación. El ángulo de desviación media calculado para el arcoíris es el correspondiente a la luz amarilla, porque es la luz de longitud media dentro del espectro visible.

Para los rayos de cuarto orden (arcoíris secundario) ocurre lo mismo, pero el ángulo de desviación mínima en este caso es de 130° (imagen 8).



Imagen 8: Fotografía de arcoíris primario (izquierda) y secundario (derecha) en la que se puede apreciar la región oscura entre ambos arcoíris (banda de Alejandro). Imagen extraída de pexels.com [10].

Entre estos dos arcos existe una región menos iluminada denominada banda oscura de Alejandro (imagen 8, imagen 9), en honor del filósofo griego Alejandro de Afrodisia, quien la describió por primera vez hacia el año 200 de la era cristiana [5]. En la región comprendida entre los ángulos del arcoíris primario y el arcoíris secundario no llega ningún rayo desviado del tercer y cuarto orden, aunque no se ve completamente oscura por el *scattering* y la difracción de la luz.

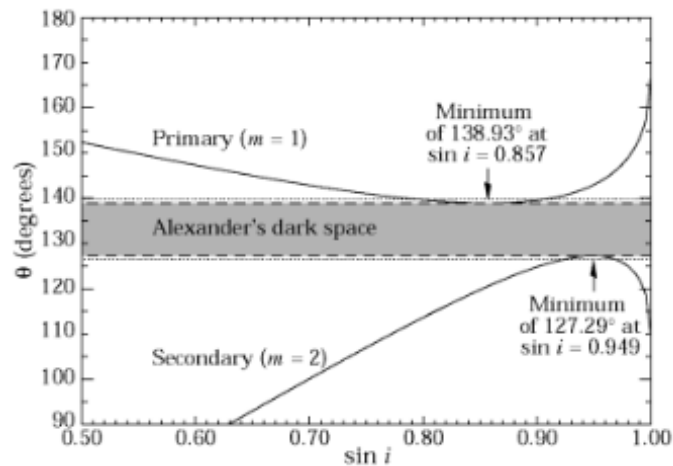


Imagen 9: Ilustración que muestra en un diagrama la banda oscura de Alejandro formada entre los ángulos de desviación mínima de los arcoíris primario y secundario. Imagen extraída de J. D., From Alexander of Aphrodisias to Young and Airy [7].

En Casini & Covello (2012) [6] se muestra un experimento parecido a los que realizaron Descartes y Teodorico con una esfera de vidrio llena de agua, pero en vez de una esfera se utiliza un cilindro (imagen 10). De esta forma se pueden diferenciar muy bien las diferentes direcciones que sigue el rayo de luz tras ser refractado y reflejado varias veces por la gota de agua (en este caso el cilindro), así como la dispersión cromática.

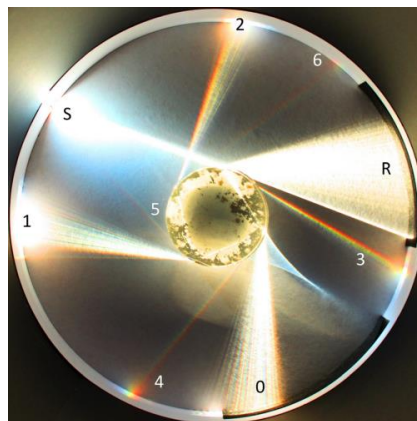


Imagen 10: Fotografía del recorrido de un rayo de luz solar al incidir sobre un cilindro lleno de agua (para simular una gota de agua). Imagen extraída de C., C., The "rainbow" in the drop. [6].

Halos

Otro de los fenómenos ópticos atmosféricos más conocidos son los halos. Estos son arcos de luz producidos por la refracción de la luz en cristales de hielo, a diferencia del arcoíris que se producía por la refracción en gotas de agua. Por lo tanto, para poder observarlos es necesario nubes altas o aire muy frío para que se formen los cristales.

Los cristales de hielo que se encuentran en el cielo pueden llegar a formar formas muy complejas, pero la mayoría tienden a formar una estructura hexagonal. Dependiendo de su forma y orientación, los cristales de hielo pueden producir diferentes tipos de halos. Edme Mariotte fue el primero en relacionar la formación de los halos de 22° con los cristales de hielo triangulares equiláteros (con forma de prisma) en 1681 [11].

Los halos más comúnmente observados son los observados a 22° alrededor del Sol. Para comprender este fenómeno óptico es necesario explicar primero los parhelios. En las nubes de tipo cirro suelen encontrarse cristales de hielo hexagonales con forma de placa (imagen 11).

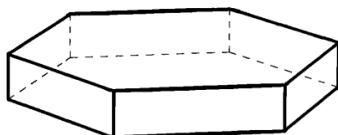


Imagen 11: cristal hexagonal con forma de placa. Imagen extraída de W. T., Atmospheric Halos [11].

Cuando estos cristales están orientados con sus caras hexagonales paralelas al horizonte, la luz que incide en sus caras laterales experimenta una desviación mínima de 22° . Su orientación en el eje vertical es aleatoria (imagen 12), pero, aunque varíe su orientación, los rayos emergentes se acercan a la desviación mínima como se puede ver en la siguiente imagen:

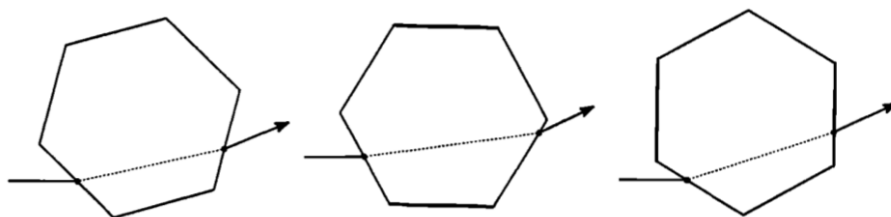


Imagen 12: trayectoria de un rayo incidente sobre un cristal hexagonal con forma de placa con diferentes rotaciones. Imagen extraída de W. T., Atmospheric Halos [11].

De esta manera, se produce una acumulación de luz en el punto de desviación mínima, igual que en un prisma. Como los rayos incidentes en la mitad superior se refractan hacia el lado contrario formando dos puntos brillantes: uno 22° a la derecha del Sol y otro 22° a la izquierda. Estos puntos se denominan parhelios o, de forma coloquial en inglés, "*Sun Dogs*" [11]. Como la luz de longitud más corta (luz azul) se refracta más que la de longitud de onda más larga, se pueden ver tonos rojizos en el lado de los parhelios más cercano al Sol y un tono más azulado en el exterior.

Existe otro tipo de cristal hexagonal: el que tiene forma de columna (imagen 13). Estos también producen una desviación mínima de la luz a 22° y, por lo tanto, forman los parhelios cuando se orientan verticalmente (con sus caras hexagonales paralelas al horizonte, como los cristales con forma de placa).

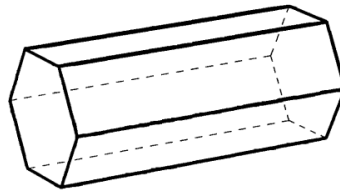


Imagen 13: cristal con forma de columna. Imagen extraída de W. T., Atmospheric Halos [11].

Estos cristales se encuentran dispuestos con diferentes orientaciones a lo largo de los tres ejes (imagen 14), sobre todo los que tienen forma de columna, y de esta manera cada cristal concentrará la luz a 22° pero en un punto diferente obteniéndose así un círculo brillante (halo) [12].

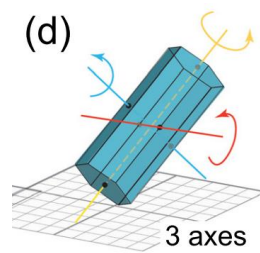


Imagen 14: cristal hexagonal en forma de columna y sus diferentes ejes de rotación. Imagen extraída de M. S., Artificial halos [12].

La combinación de las diferentes formas y orientaciones de los cristales no solo forman los halos de 22° , sino que hay una gran diversidad de halos que se pueden generar [13]. En las imágenes 15 y 16 se pueden ver algunos ejemplos:

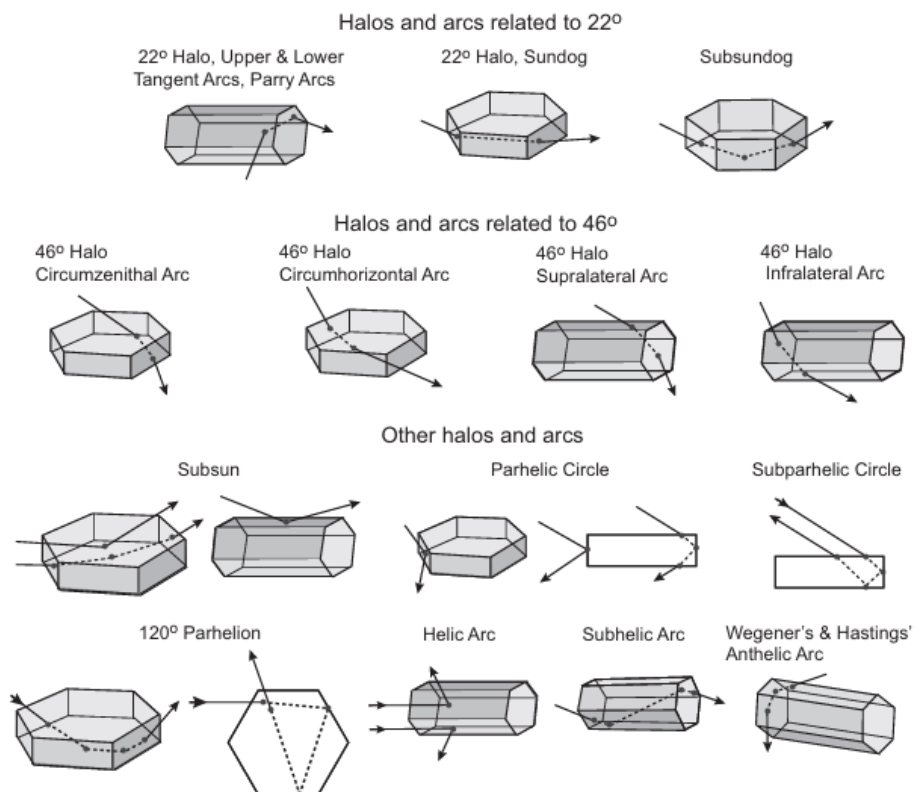


Imagen 15: esquema de los principales tipos de halo y cómo se forman. Imagen extraída de K. L., P. Y. y Y. T., Light scattering by ice crystals. Fundamentals and Applications [13].

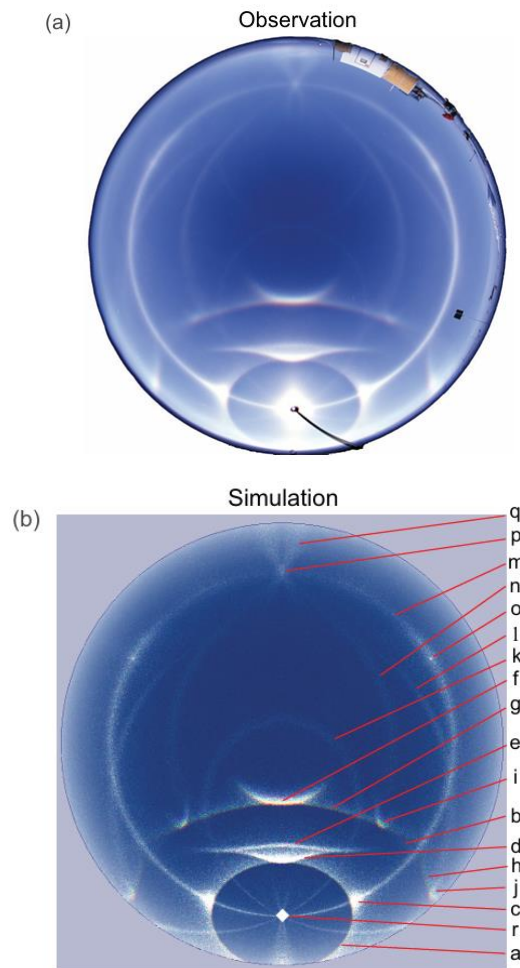


Imagen 16: (a) Complejo de halos y arcos observado en la Antártida por Riikonen (1999).

(b) Simulación de halos con trazado de rayos geométrico por un programa desarrollado por Les Cowley y Michael Schroede (2009, HaloSim computer ray tracing, Les Cowley– <http://www.atoptics.co.uk>). Se identificaron: (a) halo de 22°, (b) halo de 46°, (c) parhelios de 22°, (d) arco tangent superior, (e) arco Parry, (f) arco circumzenital, (g) arco supralateral, (h) arco infralateral, (i) arco Parry supralateral, (j) arco Parry infralateral, (k) arco helicoidal, (l) arco subhelicoidal, (m) círculo parhelicoidal, (n) arco Wegener, (o) parhelios de 120°, (p) anthelion, (q) arco difuso, y (r) una forma de diamante, que es un patrón de difracción de Fraunhofer en superposición de un pilar solar débil. Imagen extraída de K. L., P. Y. y Y. T., Light scattering by ice crystals. Fundamentals and Applications [13].

Espejismos

Los espejismos son imágenes distorsionadas de objetos provocadas por las propiedades refractivas de una atmósfera no uniforme [14]. Nuestra atmósfera está formada por capas de aire de diferentes temperaturas, y esto afecta a la densidad del aire: el aire caliente es menos denso que el aire frío. El índice de refracción del aire es mayor cuando menor es la temperatura, así que la superposición de diferentes capas de aire con diferentes temperaturas (y, por lo tanto, diferentes densidades) provoca que los rayos de luz se “curven” de manera progresiva y generen imágenes aparentemente desplazadas.

Dependiendo de cómo se sitúen las capas de aire se pueden diferenciar tres tipos principales de espejismos:

Espejismo inferior

Es el más común, y suele producirse en el desierto o en la carretera cuando está muy caliente el asfalto. Cuando la arena o el asfalto se calientan mucho, la capa de aire más cercana al suelo adquiere una temperatura superior a la de las capas de aire superiores [14].

Cuando el Sol se encuentra en el horizonte, los rayos atraviesan esas capas con diferente índice de refracción y se curvan hacia arriba (imagen 17). Esto hace que el observador perciba una imagen invertida en el suelo, dando la sensación de que hay un charco de agua porque se reflejan las cosas.

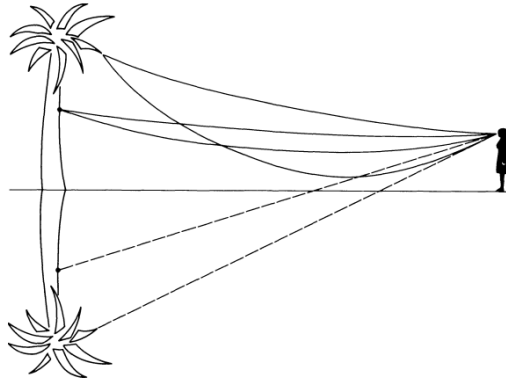


Imagen 17: Diagrama de la trayectoria que siguen los rayos en un espejismo inferior para formar la imagen volteada. Imagen extraída de R. G., Rainbows, Halos and Glories [14].

Como la imagen que se genera está invertida y justo en el suelo (sea asfalto o arena), se asemeja a la reflexión del agua, dando así la sensación de haber un charco de agua justo debajo del objeto (imagen 18) [15].

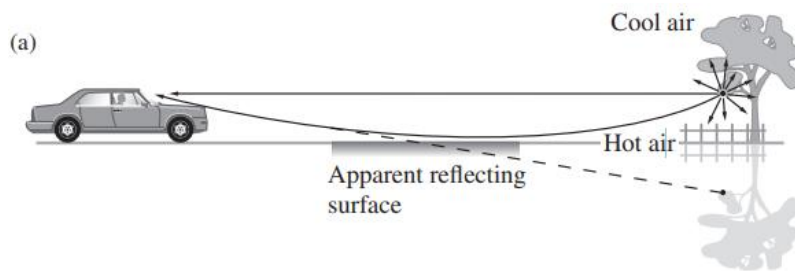


Imagen 18: Aparente reflejo del agua que proviene de un espejismo inferior en la carretera. Imagen extraída de E. H., Optics [15].

Espejismo superior

Ocurre en las condiciones inversas que el espejismo inferior: cuando una capa de aire caliente se encuentra justo encima de una de aire con menor temperatura al estar sobre una superficie más fría [14]. En este caso, los rayos se curvan hacia abajo, generando una imagen aparente por encima de la posición real del objeto (imagen 19). Este fenómeno, que se produce típicamente sobre el mar, es menos frecuente, pero produce la ilusión óptica de barcos flotantes o incluso islas flotantes cuando se encuentran a lo lejos.

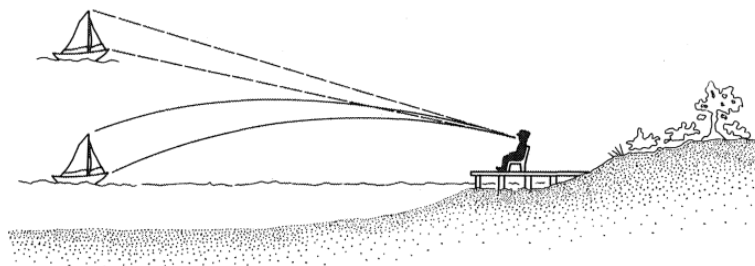


Imagen 19: Diagrama de la trayectoria que siguen los rayos en un espejismo superior para formar la imagen sobre la del objeto real. Imagen extraída de R. G., Rainbows, Halos and Glories [14].

Fata Morgana

El nombre de Fata Morgana proviene del italiano “Morgan le Fay” (Morgan el hada) por la leyenda celta sobre el hada Morgana que utilizaba sus poderes para crear castillos flotantes para engañar a los marineros, y es representada por un palacio de cristal bajo las olas [14].

Se trata de un tipo de espejismo superior más complejo. Se forma cuando se intercalan varias capas de aire de diferente temperatura (intervalos de aire caliente y frío). Esta situación provoca que los rayos formen una superposición de varias imágenes del mismo objeto, siendo algunas invertidas y otras erectas, que aparecen distorsionadas y fluctuantes.

En la imagen 20 se puede ver cómo en el horizonte aparecen unas “torres de hielo” que al acercar la posición de la cámara al suelo desaparecen. Estas torres son realmente imágenes creadas por el efecto de la Fata Morgana, que disminuye al acercar al suelo el punto de observación.

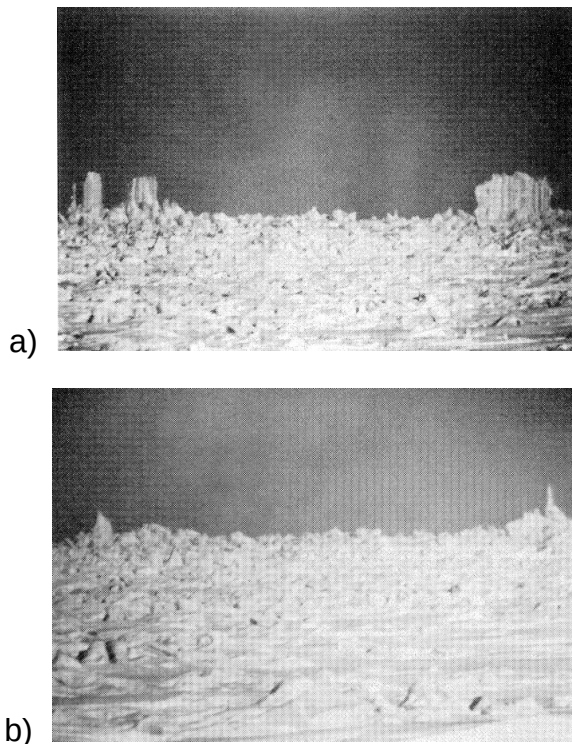


Imagen 20: a) Fotografía tomada en el Océano Ártico congelado a 4-5 metros de la superficie. b) Fotografía tomada desde el mismo punto que la anterior pero a unos 150cm más abajo (donde el efecto del espejismo es menor). Imagen extraída de R. G., Rainbows, Halos and Glories [14].

Fenómenos de difracción

A diferencia de los fenómenos de refracción, en los fenómenos de difracción la luz no atraviesa gotas de agua ni cristales, sino que rodea partículas muy pequeñas suspendidas en el aire. Esto provoca que la luz se disperse de una forma muy característica formando un patrón de anillos concéntricos o brillos suaves alrededor del Sol, la Luna o la sombra del propio observador. Esta es la base de la explicación de la formación de las glorias y las coronas lunares, que visualmente pueden confundirse con los halos, o de los arcos supernumerarios, que pueden confundirse con un arco más del arcoíris, aunque su origen físico sea diferente.

Corona

Una corona, también llamada aureola, es un anillo o conjunto de anillos concéntricos coloreados, de pequeño tamaño angular, que rodean el Sol o la Luna cuando los cubre una nube poco densa formada por pequeñas gotitas [16, 17]. La mayoría de las ocasiones en las que se observa una corona suele ser alrededor de la Luna, ya que la luz que emite el Sol es mucho más intensa y dificulta la visibilidad de su alrededor.

Visualmente podría confundirse con el halo de 22° , pero existen varias diferencias observables. Una de ellas es que el diámetro angular de las coronas es mucho más pequeño que el de los halos. Además, los colores están invertidos con respecto a los halos: el azul está en el interior de los anillos y el rojo en el exterior (imagen 21).



Imagen 21: Corona lunar. Fotografía realizada por Eva Seidenfaden. Imagen extraída de L. C., P. L. y M. V., Rings around the sun and moon: coronae and diffraction [16].

La diferencia más importante radica en cómo se forma cada uno. Los halos, como ya se ha explicado, se forman por la refracción de los cristales de hielo hexagonales presentes en la atmósfera, mientras que las coronas se forman por difracción.

La difracción ocurre cuando un obstáculo lo suficientemente pequeño, en este caso las gotas pequeñas de agua presentes en las nubes, se sitúa enfrente de la fuente de luz. Estas gotas suelen tener un diámetro medio de $10\text{-}15\text{ }\mu\text{m}$. Esto es importante porque el tamaño de la longitud de onda del espectro de luz visible lo suficientemente cercano al diámetro de las gotas como para producir una difracción significativa y observable: cuanto más pequeñas y uniformes sean las gotas más se acercarán al tamaño de la longitud de onda de la luz visible y más brillante y definida será la corona.

Los diámetros de los anillos no dependen solo del tamaño de las gotas, sino también de la longitud de onda de la luz, provocando que los anillos de luz roja (de longitud de onda $0.70\text{ }\mu\text{m}$) sean mayores que los de luz azul ($0.45\text{ }\mu\text{m}$), por eso el color rojo en las coronas se encuentra en el exterior.

La corona sigue el patrón de difracción de campo lejano de Fraunhofer al encontrarse lo suficientemente lejos de la fuente de luz y del observador. En la imagen 22 se puede observar cómo interactúa una onda con una gota pequeña de agua.

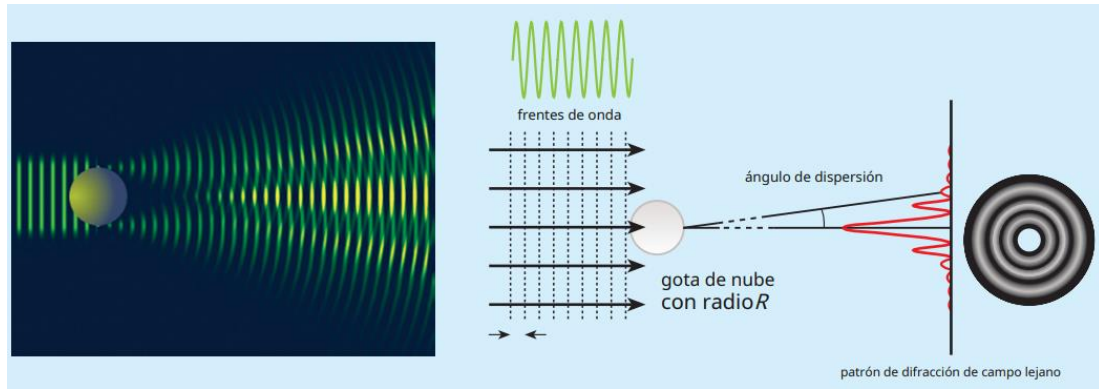


Imagen 22: A la izquierda se muestra cómo un frente de ondas interfiere con un pequeño obstáculo circular (gota de agua) y a la derecha se observan los máximos y los mínimos que producen el patrón de anillos concéntricos en el campo lejano. Imagen extraída de L. C., P. L. y M. V., Rings around the sun and moon: coronae and diffraction [16].

El patrón de difracción de Fraunhofer se calcula utilizando el principio de Huygens, el cual establece que cada punto de un frente de onda actúa como una nueva fuente de ondas secundarias. Estas nuevas ondas interfieren entre sí destructivamente (anillos oscuros) en unos puntos y constructivamente (anillos de luz) en otros, conformando así el patrón de anillos concéntricos que se muestra en la derecha de la imagen 16. El conjunto de estas ondas es el nuevo frente de onda.

La distribución de intensidades en función del ángulo de dispersión para un obstáculo circular viene dada por la función de Bessel $J_1(x)$ donde:

$$x = \frac{2\pi R \sin(\theta)}{\lambda}$$

siendo λ la longitud de onda y R el radio del obstáculo circular.

La intensidad de un punto situado a una distancia angular θ se calcula:

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{2J_1(2\pi R \sin(\theta)/\lambda)}{2\pi R \sin(\theta)/\lambda} \right)^2$$

$I(0)$ es la intensidad en el disco central (conocido como mancha de Airy) del patrón de anillos, donde es máxima. Esta disminuye rápidamente a medida que los anillos son más grandes, siendo en el primer y segundo máximo del 1,75% y el 0,42% respectivamente de la intensidad de la luz dispersa frontal. Estos máximos ocurren en $x=5,14$ y $x=8,42$, mientras que los dos primeros mínimos ocurren en $x=3,83$ y $x=7,02$.

Por lo tanto, el ángulo de dispersión para el primer mínimo θ_1 para una longitud de onda determinada y un radio R del obstáculo será:

$$\sin \theta_1 = \frac{3,83}{\pi} \frac{\lambda}{2R} = 1,22 \frac{\lambda}{2R}$$

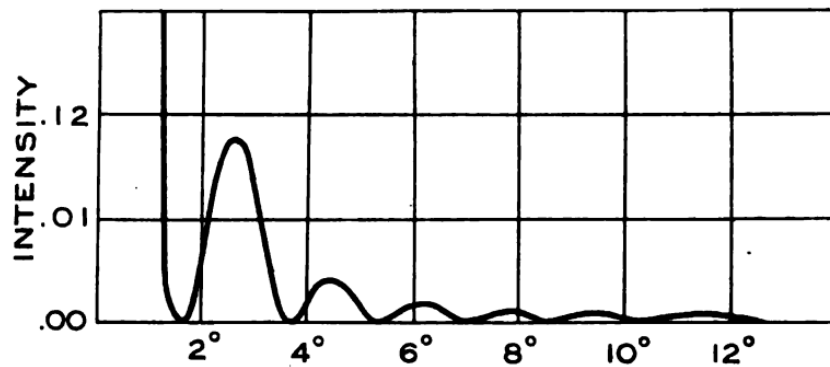


Imagen 23: Distribución de intensidad producida por una gota de agua de radio $R= 10\ \mu\text{m}$ y una longitud de onda de $\lambda= 0,571\ \mu\text{m}$. Imagen extraída de W. J. H., C. E., y P.D., Physics of the air [18].

En la imagen 23 se muestra la distribución de intensidad producida por una gota de agua de radio $R= 10\ \mu\text{m}$ y una longitud de onda de $\lambda= 0,571\ \mu\text{m}$. El primer mínimo, se puede calcular con la ecuación anterior, siendo el resultado $\theta_1 \approx 1^\circ 59'$ [18].

De esta manera, se puede ver que cuanto más pequeña sea la gota (menor R), mayor será el tamaño angular de la corona, pues el primer mínimo estará más lejos del centro. Así, podemos utilizar el tamaño de los anillos de la corona para calcular el tamaño de las gotas. Hay que tener en cuenta que este cálculo solo se puede aplicar a una longitud de onda determinada, así que no es muy preciso para la luz solar, ya que no es luz monocromática.

Las coronas pueden producirse no solo por la difracción que generan las pequeñas gotas de agua, sino también otras partículas presentes en la atmósfera como ceniza volcánica, algunos cristales de hielo o incluso los granos de polen transportados por el viento. Cualquier tipo de partícula presente en la atmósfera producirá difracción si son lo suficientemente pequeñas, de tamaño uniforme, y están presentes en una concentración lo suficientemente alta.

Espectro de Brocken (gloria)

En determinadas ocasiones se puede llegar a ver un conjunto de anillos coloreados que rodea la sombra del observador proyectada sobre una nube cercana o niebla, cuando el Sol está justo detrás. Suele apreciarse mejor en la cima de una montaña o desde un avión.

Este fenómeno se denomina espectro de Brocken [17, 18], debido a su frecuente aparición en el Brocken, el pico más alto de las montañas del Harz (Alemania). Se compone de dos partes: la reflexión de la luz por las gotas de las nubes o niebla y la difracción que sufre esa luz reflejada producida por pequeñas partículas cercanas a la superficie reflectante.

La luz reflejada emerge en todas las direcciones, pero cuanto más cerca se encuentre el observador de la dirección de incidencia, mayor intensidad de luz observará (recordemos las reflexiones de un haz de luz en el interior de una gota de agua: la primera reflexión emerge de la gota en la misma dirección de incidencia y, además, va perdiendo intensidad con cada reflexión), y más brillantes serán los efectos de difracción.



Imagen 24: Espectro de Brocken. Fotografía tomada por M. Gilby en el Macizo del Jura. Imagen extraída de W. J. H., C. E., y P.D., Physics of the air [18].

En el espectro de Brocken, la sombra del observador aparece a menudo agrandada y con forma triangular (imagen 24), debido a su posición y la corta distancia que hay entre él y las nubes en las que se proyecta su sombra. Desde un avión la sombra no suele verse agrandada, pues la distancia que hay hasta las nubes es mayor. De igual forma, también se forman los anillos coloreados alrededor de la sombra, denominados comúnmente como gloria. Aunque la distancia que hay entre las nubes y el observador sí influye en el tamaño de la sombra, no influye en el tamaño angular de la gloria.

Cuanto más lejos está el avión e las nubes, menos nítidos se ven los bordes de la sombra, hasta que llega un punto en el que cuando el avión está lo suficientemente lejos se logra apreciar la gloria sin divisarse la sombra del avión (imagen 25).



Imagen 25: Gloria formada en nubes lejanas. Fotografía tomada en el Atlántico. Imagen extraída de W. J. H., C. E., y P.D., Physics of the air [18].

Al igual que en la corona, el tamaño de la gloria depende del tamaño de las gotas de agua. La variación de intensidad del patrón de la gloria podría calcularse con la teoría de dispersión de Mie, pero no existe un modelo simple que nos describa la explicación física del proceso de formación de la gloria como en el caso de las coronas.

Arcos supernumerarios

Además del arcoíris primario, secundario y los formados por los diferentes órdenes, existe otro fenómeno que se forma con los arcoíris denominados arcos supernumerarios [5]. Son una sucesión de bandas en las que se alternan el rosa y el verde en el lado interno del arcoíris primario, pero estos, a diferencia de los arcoíris de diferentes órdenes, se forman por la propiedad de difracción de la luz (imagen 26).

Los arcos supernumerarios se forman por dos rayos de tercer orden que tienen el máximo y el mínimo valor de parámetro de impacto del arcoíris (uno el máximo y otro el mínimo) y emergen de la gota en la misma dirección.

Estos dos rayos se comportan de igual forma que la luz que atraviesa los dos agujeros en el famoso experimento de Thomas Young de 1803. Cuando los ángulos de desviación son muy próximos a los del arcoíris primario, la diferencia entre los caminos ópticos de ambos rayos dentro de la gota es mínima, produciendo una interferencia constructiva. A medida que aumenta el ángulo, la diferencia de trayectorias se incrementa hasta que esta alcanza la mitad de la longitud de onda, se entonces cuando se produce una interferencia destructiva. Si el ángulo sigue creciendo, la luz vuelve a reforzarse, generando un patrón de zonas claras y oscuras.

La separación angular entre los arcos supernumerarios es más estrecha cuando las gotas son más grandes, ya que en ese caso la diferencia entre los trayectos aumenta más rápidamente en función del parámetro de impacto.



Imagen 26: Fotografía de un arcoíris realizada por Iván Medina Delli en Tenerife. En ella se puede observar el arcoíris primario, a su izquierda los arcos supernumerarios y a su derecha la banda oscura de Alejandro. Imagen extraída de AME, Fotometeo [19].

Conclusiones

Los fenómenos ópticos atmosféricos son un ejemplo de cómo la física y, más concretamente, la óptica puede explicar alguno de los efectos visuales más fascinantes que podemos observar en la naturaleza. En este trabajo se ha investigado cómo interacciones aparentemente simples entre la luz y los diferentes elementos de la atmósfera (gotas de agua, cristales de hielo, capas de aire) pueden generar efectos tan complejos y diversos.

Para poder tener una correcta comprensión de estos fenómenos, es necesario entender las nociones básicas sobre el comportamiento de la luz en un medio: reflexión, refracción, dispersión cromática y difracción. Aunque en algunos casos los fenómenos pueden llegar a parecerse, cada uno tiene unas condiciones específicas de aparición que permiten diferenciarlos, como la presencia del Sol y gotas de agua para los arcoíris, nubes altas formadas por cristales de hielo para los halos, o un fuerte gradiente de temperatura que provoque la estratificación del aire y cambios en su índice de refracción para los espejismos.

Además de su valor estético, cultural o religioso, el estudio de estos fenómenos también tiene aplicaciones prácticas en meteorología, como la posibilidad de calcular el tamaño de las gotas de agua presentes en las nubes con el estudio de las propiedades de una corona o el estudio de la densidad de cristales o su tamaño en las nubes de tipo cirro con la observación de los halos.

Por lo tanto, se puede concluir que con la óptica que se estudia en el grado de Óptica y Optometría se puede comprender el funcionamiento de estos fenómenos, no solo para explicar lo que observamos en el cielo y conocer el origen de mitos religiosos y leyendas, sino también por su interés científico y aplicaciones prácticas.

Bibliografía

1. Frederick Marryat. El buque fantasma; Barcelona, España: Ediciones Abraxas; 2019.
2. Daniel Malacara. I. Fundamentos de la óptica geométrica. En: Daniel Malacara. Óptica básica; Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica; 2015: Tercera edición: Pág. 29-54.
3. Eugene Hecht. 10. Diffraction. En: Eugene Hecht. Optics; Harlow, Inglaterra: Pearson Education Limited; 2017: Quinta edición: Pág. 457-541.
4. Daniel Malacara. X. Difracción. En: Daniel Malacara. Óptica básica; Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica; 2015: Tercera edición: Pág. 275-296.
5. H. Moysés Nussenzveig. Teoría del arco iris. Investigación y Ciencia.1977;9:82-95.
6. Giovanni Casini, Antonio Covello. The "rainbow" in the drop. American Journal of Physics. 2012; 80:1027-1034.
7. J.D. Jackson. From Alexander of Aphrodisias to Young and Airy. Physics Reports. 1999; 320:27-36.
8. Daniel Malacara. IV. Prismas, espejos planos y prismas cromático dispersores. En: Daniel Malacara. Óptica básica; Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica; 2015: Tercera edición: Pág. 81-98.
9. Craig F. Bohren, Alistair B. Fraser. Newton's zero-order rainbow: Unobservable or nonexistent?. American Journal of Physics. 1991; 59:325-326.
10. B. Joseph, I. Joseph, D. Joseph. Pexels. pexels.com (20 de junio de 2025).
11. Walter Tape. Atmospheric Halos. Antarctic Research Series. 1994;64;1-143.
12. Markus Selmke. Artificial halos. American Journal of Physics. 2015;83;751-760.
13. Kuo-Nan Liou, Ping Yang, Yoshihide Takano; Principles of geometric optics for application to light scattering by ice crystals. En: Kuo-Nan Liou, Ping Yang, Yoshihide Takano; Light scattering by ice crystals. Fundamentals and Applications; Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press; 2016: Pag. 115-196.
14. Robert Greenler. 7. Atmospheric refraction: mirages, twinkling stars, and the green flash. En: Robert Greenler. Rainbows, Halos and Glories; Washington, USA: SPIE; 2020: Pág. 151-177.
15. Eugene Hecht. 4. The Propagation of Light. En: Eugene Hecht. Optics; Harlow, Inglaterra: Pearson Education Limited; 2017: Quinta edición: Pág. 96-158.
16. Les Cowley, Philip Laven, Michael Vollmer. Rings around the sun and moon: coronae and diffraction. Physics Education. 2005; 40:51-59.
17. Robert Greenler. 6. Diffraction: the corona, the glory, and the specter of the Brocken. En: Robert Greenler. Rainbows, Halos and Glories; Washington, USA: SPIE; 2020: Pág. 139-150.
18. W. J. Humphreys, C. E., PH. D. Chapter VI. Diffraction phenomena. En: W. J. Humphreys, C. E., PH. D. Physics of the air; Filadelfia: J. B. Lippincott Cmpany; 1920: Pág. 528-537.
19. Asociación Meteorológica Española (AME). Fotometeo. <https://fotometeo.ame-web.org/displayimage.php?pid=3353> (5 de junio de 2025).