

Corona y difracción

Aprendiendo física con los fenómenos ópticos de la atmósfera

Reinaldo Welti

Departamento de Física y Química – FCEIA – UNR

Avenida Pellegrini 250 – (2000) Rosario

E-mail: welti@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Algunos fenómenos que se observan en la atmósfera pueden enseñar mucho acerca de la Física, y en especial, sobre la óptica. Los anillos coloreados alrededor del sol y la luna, conocidos como *corona* son una consecuencia, en gran escala, del fenómeno de difracción, el cual es usualmente considerado como un fenómeno que tiene lugar solamente a pequeña escala en el interior de un laboratorio. En este artículo vamos a describir las coronas del sol y la luna, cómo se forman y los experimentos que se pueden realizar con la simple observación del cielo. Como estas experiencias no son siempre viables ni recomendables, especialmente los que se refieren al sol, también se propone realizar el análisis de la corona y la difracción mediante experimentos en el laboratorio.



Figura 1. Una corona lunar de anillos múltiples. El brillo de la aureola central oculta la luna.



Física 2. Las coronas varían de tamaño y pueden alcanzar aproximadamente 15° . Se reducen y se agrandan cuando diferentes nubes pasan delante de la luna. Se puede estimar su tamaño si se lo compara con el disco de la luna de 0.5° de diámetro.

Introducción

La luz del sol o de la luna que incide sobre gotas de lluvia, gotas de nube, el polvo o cristales de hielo de la atmósfera producen una gran variedad de espectáculos visuales. El arco iris es el más conocido pero hay muchos otros: las glorias, las coronas, halos de hielo y muchos más. Todos estos fenómenos son accesibles con la simple observación del cielo y hay varias descripciones simples de los mismos en revistas, libros y páginas web. Cada fenómeno es una manifestación de la intervención de diferentes principios físicos, y su observación y estudio proporcionan un contexto para el aprendizaje de la física desde un nivel elemental hasta el de investigación. En este trabajo nos ocuparemos de la física que está detrás del fenómeno meteorológico denominado corona.

¿Qué es una corona?

Una corona es el conjunto de anillos de colores delicados y suaves que se observan cuando el sol o la luna están parcialmente cubiertos por nubes de pequeño espesor o de muy baja densidad. Se observan alrededor de la luna cuando ésta está llena y el cielo está oscuro. Al observar una corona solar, es necesario protegerse del sol mediante algún dispositivo que reduzca su intensidad a

niveles seguros. Mirar fija y directamente al sol puede dañar permanentemente la vista. Por ese motivo en este artículo vamos a describir las coronas alrededor de la luna. Las Figs.1 y 2

muestran las características de una corona. En el centro hay una aureola muy brillante, casi blanca con un borde amarillo y rojo. A veces eso es todo lo que se ve, pero, las mejores coronas tienen varios anillos coloreados que rodean la aureola central que se hacen sucesivamente más débiles. El primero es azulado por dentro, pasando por verde y amarillo hasta llegar al rojo más exterior. Los anillos siguientes no tienen el azul, pero tienen colores equivalentes. Todos los colores son mezclas suaves en contraste con los matices francos que presente el arco iris.

No se debe confundir una corona con la aureola, de aproximadamente 22° de radio, que es producida por cristales prismáticos hexagonales de hielo ni con la atmósfera exterior que rodea el sol y que es visible durante un eclipse total y que tiene el mismo nombre.

La corona: una consecuencia de la difracción

La difracción es la causa de la corona. Habitualmente la difracción es un fenómeno que se produce y observa a pequeña escala dentro de un laboratorio. La corona es una demostración de que el fenómeno de difracción puede producirse a gran escala en el cielo, donde todos lo pueden ver y, puede ser usada para explicar algunos de sus principios.

La difracción tiene lugar cuando luz es obstruida por un obstáculo. Mientras la óptica geométrica establece que la sombra, producida por un obstáculo, está bien definida, la óptica ondulatoria demuestra que la luz puede llegar a la zona de sombra que predice la óptica geométrica. Los obstáculos que dan origen a la corona son las gotitas de agua de la nube.

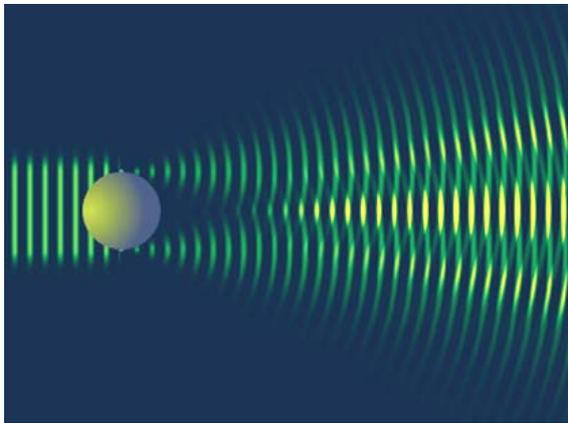


Figura 3. Difracción de la luz por una esfera

Estas tienen tamaños que se extienden de 1 a $100 \mu\text{m}$ con un diámetro medio del orden de $10\text{--}15 \mu\text{m}$. Las longitudes de ondas de la luz visible, que van desde $0,45 \mu\text{m}$ (azul) a $0,70 \mu\text{m}$ (rojo), son mucho más pequeñas pero, el cociente *longitud de onda / radio de la gota* es lo suficientemente grande para producir una significativa difracción cuando la luz del sol o de la luna los ilumina. Por comparación, las gotas de lluvia que tienen dimensiones del

orden del *mm* no producen coronas observables.

Como la distancia del observador a la nube es mucho más grande que el diámetro de las gotitas los efectos corona se explican mediante la difracción en la zona lejana, llamada *difracción de Fraunhofer*. La Fig.3 ilustra la interacción de una onda con una gota esférica que produce una difracción tipo corona. La Fig.4 muestra mediante un esquema la distribución de la intensidad de la luz difractada en función del ángulo.

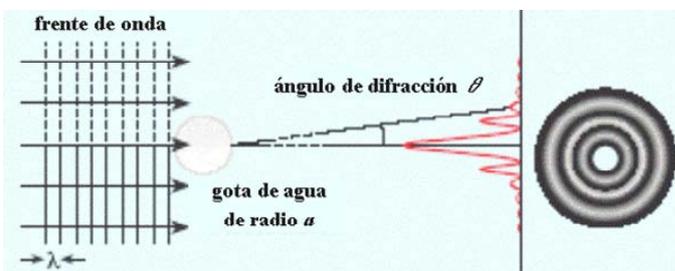


Figura 4. Intensidad de la luz difractada por una esfera en función del ángulo.

En los cursos de Física de los primeros años de las carreras de ciencias e ingeniería la teoría de la difracción que se desarrolla es la difracción de Fraunhofer producida por ranuras y aberturas circulares. Esta última tiene aplicaciones prácticas en lentes y espejos. Se puede tratar la difracción por una gota de agua utilizando el *principio de Babinet*. Este principio predice

que la difracción por una abertura circular es idéntica a la que produce un obstáculo con forma de disco, siendo la única diferencia práctica la luz brillante que por el exterior del obstáculo sin difractarse. Si aproximamos las gotas por discos opacos entonces tenemos la base para predecir su difracción: la difracción de una gota de nube es aproximadamente igual a la de un disco del

mismo radio, la que a su vez es igual a la difracción por una abertura circular. En otras palabras, la física de la corona es la misma que describe los anillos de difracción que rodean una estrella cuando se la observa por medio de un telescopio de alta potencia.

Cuantitativamente, el patrón de difracción de Fraunhofer se calcula usando el *principio de Huygens*: cada punto de la abertura se supone que es una fuente puntual de ondas esféricas que se superponen para producir el patrón observado. Matemáticamente, la intensidad de la distribución, en función del ángulo de difracción θ , para un disco opaco de radio a se expresa en términos de la *función de Bessel* $J_1(x)$ donde $x = 2\pi a \sin \theta / \lambda$ y λ es la longitud de onda de la luz:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{2J_1(2\pi a \sin \theta / \lambda)}{2\pi a \sin \theta / \lambda} \right)^2 \quad (1)$$

La intensidad máxima I_0 que está en la dirección de la luz incidente, $\theta = 0$, es proporcional al área del disco. La función de Bessel oscila como una función seno pero su amplitud decae rápidamente con el incremento del ángulo. El primer y el segundo máximo son solamente 1,75% y 0,42% respectivamente, del máximo principal. Estos máximos ocurren para $x = 5,14$ y $8,42$. Los primeros dos mínimos están en $x = 3,83$ y $7,02$.

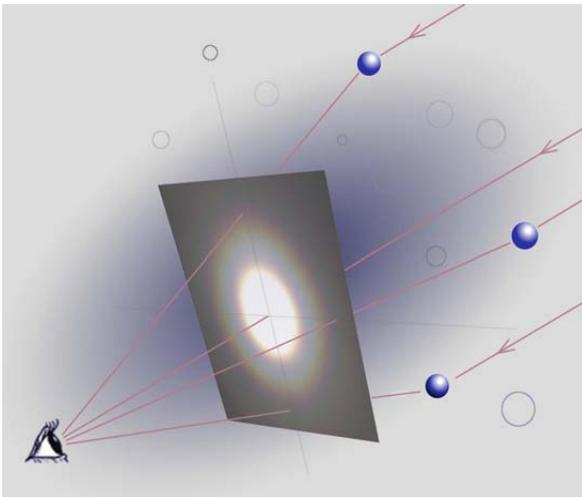


Figura 5. La corona es la superposición de la luz difractada por millones de pequeñas gotas de agua u otras partículas, individualmente.

rápido con el incremento del ángulo. El primer y el segundo máximo son solamente 1,75% y 0,42% respectivamente, del máximo principal. Estos máximos ocurren para $x = 5,14$ y $8,42$. Los primeros dos mínimos están en $x = 3,83$ y $7,02$.

El ángulo de difracción para el primer mínimo θ_1 para una dada longitud de onda y radio a es entonces:

$$\sin \theta_1 = 3,83 \frac{\lambda}{2\pi a} = 1,22 \frac{\lambda}{2a} \quad (2)$$

Cuando más pequeña es la gota más grande es el diámetro de la corona, y en principio podemos usar el ángulo de difracción para medir el radio de la gota de las nubes. La ecuación (1) es para luz monocromática. Más adelante se darán detalles para evaluar el

tamaño de las gotas para la difracción de luz blanca.

Una obvia diferencia entre el patrón de difracción de una sola abertura y una corona es que esta última está producida por muchas gotas. Sin embargo, la luz de la corona que puede ver un observador no es debido a la difracción múltiple. Como la distancia media entre las gotas de la nube es mucho más grande que su diámetro la corona es una consecuencia de la superposición de una *única difracción* causada por muchas gotas. Esto es lo que permite que podamos ver a través de la nube que produce la corona. Las nubes más espesas que oscurecen el disco del sol o de la luna están caracterizadas por difracción múltiple. La corona que vemos, como la que se muestra en la Fig.4, es la superposición de la luz difractada por millones de gotas independientes.

Hasta acá hemos supuesto que todas las gotas tienen el mismo radio y las mejores coronas se observan justamente cuando esto es cierto. Las gotas tienen el mismo tamaño, si se originan simultáneamente, durante un intervalo de tiempo corto después de haber transcurrido poco tiempo de su formación. Este tipo de gotas se encuentra con frecuencia en nubes del tipo altocumulus, cirrocumulus y cirrostratus.

En la Fig.6 se muestra la intensidad I de la onda difractada, por una gota de radio $a = 10 \mu\text{m}$, en función del ángulo θ para cuatro colores diferentes (azul, $\lambda = 0.460 \mu\text{m}$; verde, $\lambda = 0.535 \mu\text{m}$; amarillo, $\lambda = 0.585 \mu\text{m}$ y rojo, $\lambda = 0.675 \mu\text{m}$). Observemos que el azul es el color que menos se difracta: en efecto, el ángulo de difracción del primer mínimo (Ec.2) de I para el color azul es

de $\theta_1(\text{azul}) = 1.60^\circ$, para el color verde es $\theta_1(\text{verde}) = 1.87^\circ$, para el amarillo, $\theta_1(\text{amarillo}) = 2.04^\circ$ y para el rojo, $\theta_1(\text{rojo}) = 2.36^\circ$. Dentro del cono de apertura $\theta < \theta_1(\text{azul})$, están presentes todos los colores: ésta es la zona central que se observa de color blanco. Para los ángulos $\theta > \theta_1(\text{azul})$ hay muy poca luz difractada de color violeta y azul, luego desaparece el verde y queda solamente el amarillo y rojo, que forman dos anillos que rodean la zona central blanca, hasta $\theta = \theta_1(\text{rojo})$ que corresponde al primer mínimo de difracción de color rojo. Después aparecen zonas donde el azul, el verde, el amarillo y el rojo tienen sucesivamente máximos de difracción.

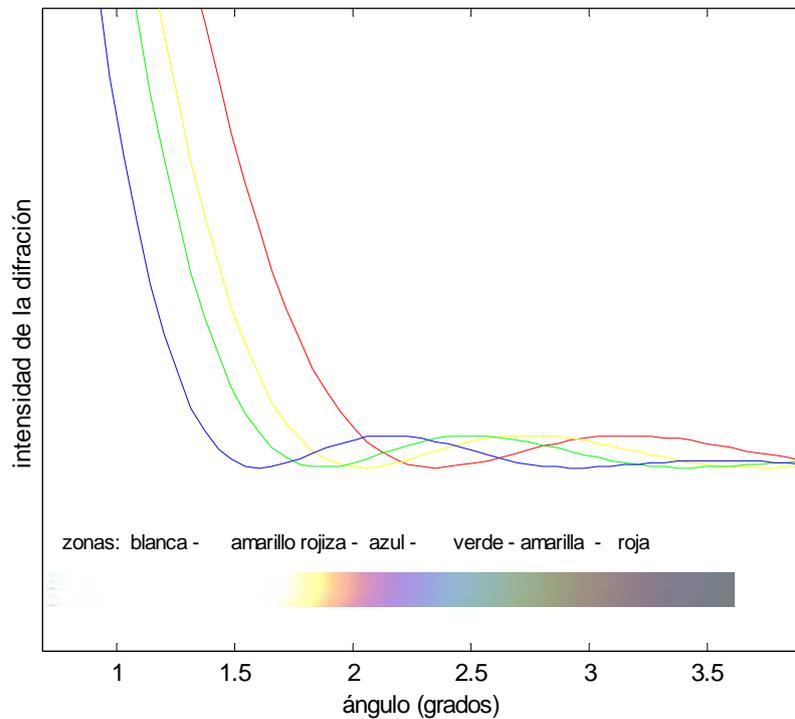


Figura 6. Intensidad I de la onda difractada, por una gota de radio $a = 10 \mu\text{m}$, en función del ángulo θ para cuatro colores diferentes (azul, $\lambda = 0.460 \mu\text{m}$; verde, $\lambda = 0.535 \mu\text{m}$; amarillo, $\lambda = 0.585 \mu\text{m}$ y rojo, $\lambda = 0.675 \mu\text{m}$). Observemos que el azul es el color que menos se difracta: el ángulo de difracción del primer mínima de I para el color azul es de 1.60° . Dentro del cono de 1.60° de apertura, están presentes todos los colores: ésta es la zona central que se observa de color blanco. Para los ángulos $\theta > 1.60^\circ$ hay muy poca luz difractada de color violeta y azul y verde, quedan solamente el amarillo y rojo, que forman dos anillos que rodean la zona central blanca, hasta $\theta = \theta_1(\text{rojo}) = 2.36^\circ$ que corresponde al primer mínimo de difracción de color rojo. Después aparecen zonas donde el azul, el verde, el amarillo y el rojo tienen sucesivamente máximos de difracción. Pero como los otros colores también se difractan en estas zonas los colores resultantes son mezclas sutiles diferentes de los matices más

Pero como los otros colores también se difractan en estas zonas los colores resultantes son mezclas sutiles diferentes de los matices más francos que se observan en un arco iris.

Si las gotas tienen una gran dispersión en su tamaño, el patrón de difracción de las diferentes gotas se superponen y la corona pierde color. En este caso, la aureola se observa como un disco central brillante alrededor del sol o de la luna.

Simulaciones con la computadora

Si bien la teoría de difracción de Fraunhofer, que se expuso más arriba, describe cualitativamente bien los hechos observados no es totalmente exacta, especialmente para gotas muy pequeñas. En efecto, la luz no solamente se difracta alrededor de la gota como si fuera un

objeto opaco, sino también se refracta y transmite a través de la gota o se producen fenómenos de reflexión total interna, etc.

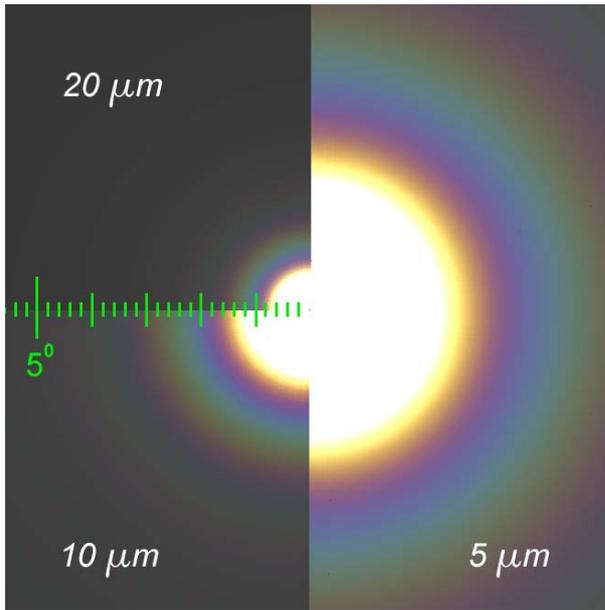


Figura 7. Simulaciones por IRIS del efecto del cambio del tamaño de las gotas. Cuando las gotas son del mismo tamaño se producen los mejores anillos. Los números son los radios de la gota.



Figura 8. Las simulaciones IRIS ilustran los efectos de la dispersión de la distribución del tamaño de las gotas. Los números son desviaciones en % alrededor del valor medio de $10 \mu m$.

una distribución normal con una desviación respecto de la media expresada con un porcentaje. ¿Cómo afecta esta no uniformidad al aspecto de la corona? En la Fig.8 se muestran los resultados del programa IRIS donde se observa que una desviación del 10% produce una disminución del contraste entre el primer anillo y los siguientes y que una desviación del 20% hace imperceptible los anillos más internos.

La teoría que describe exactamente la interacción de la luz con gotas esféricas ha sido formulada por G. Mie en 1908 utilizando las ecuaciones de Maxwell y sin hacer ninguna hipótesis simplificatoria. Los cálculos, aún cuando son extremadamente laboriosos y complicados, se pueden hacer de manera simple y efectiva con una PC relativamente rápida.

Existen en la Web programas de libre acceso que utilizan la teoría de Mie para producir simulaciones de coronas a todo color. Uno de estos programas es el IRIS. Este programa grafica las coronas como se la vería en el cielo y pueden ser directamente comparadas con las observaciones. IRIS hace simulaciones calculando la intensidad difractada, sobre un intervalo de ángulos, para una sola longitud de onda. Para hacer simulaciones con luz blanca es necesario repetir los cálculos para un centenar de longitudes de onda dentro del rango visible. Los resultados se suman después de pesarlos con factores que tienen en cuenta la distribución espectral de la potencia de la luz solar incidente.

La Fig.7 muestra simulaciones con IRIS de la corona producida por tres tamaños de gotas diferentes. Estas simulaciones muestran cuán tenues son los anillos coloreados comparados con la aureola central y cómo los anillos sucesivos son cada vez menos perceptibles. Estos efectos son una consecuencia de la rápida disminución de la intensidad con el incremento del ángulo que predice la Ec.(1) (y que se muestra en la Fig.6) y por la superposición de anillos de colores diferentes.

Las simulaciones de la Fig.7 son para gotas del mismo tamaño. Generalmente las gotas tienen una gama de tamaños que por conveniencia puede ser representada por

El tamaño de la gota puede afectar la visibilidad de coronas en otra manera. Cuando las gotas son muy pequeñas ($a < 5 \mu\text{m}$), la luz difractada se distribuye sobre un rango angular grande y la corona aparece relativamente desvanecida. Si las gotas tienen un tamaño mayor que $40 \mu\text{m}$, los anillos se distribuyen sobre un rango angular pequeño y, entonces, el diámetro angular aparente del sol o de la luna ($\sim 0.5^\circ$) atenúan, por contraste, a los anillos. En conclusión, las coronas naturales observan mejor cuando sus radios están entre 5 y $20 \mu\text{m}$.

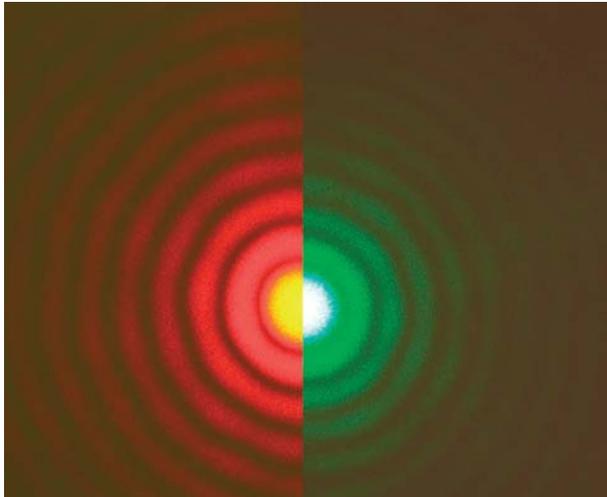


Figura 9. Difracción por una abertura de 60 mm iluminado por un láser de $0.633 \mu\text{m}$ (rojo) y $0.543 \mu\text{m}$ (verde). Las imágenes que se han obtenido por separado se muestran uno al lado del otro. El falso color central está causado por la sobre-exposición.

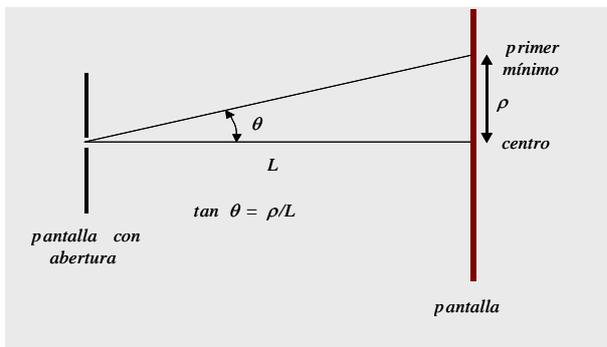


Figura 10. Geometría para determinar el ángulo de difracción. El ángulo medido para el primer mínimo fue de $0,37^\circ$, obteniéndose para la abertura un radio de $59,8 \mu\text{m}$.

Experimentos con coronas naturales

Observando una corona real alrededor de una luna llena es posible advertir la aureola central, contar sus anillos y los colores de los mismos. Se pueden tomar fotografías con cámara digital y usarla para medir los diámetros de las gotas de agua. Las imágenes de una corona tomadas con una cámara digital precisan una calibración angular. Lo más simple es tomar una fotografía, correctamente expuesta, de la luna y calibrar las imágenes de las coronas, sabiendo que el diámetro de la luna tiene un ancho angular de 0.5° .

Una alternativa es utilizar una simple “ballesta” (ver Anexo I) que es básicamente una regla graduada curva que está fijada sobre el extremo de una barra recta.

Se puede estimar el tamaño de las gotas que crean una corona midiendo el diámetro de los anillos de uno o dos colores y comparar con el máximo de la Ec.1. Supongamos que se observa que el primer máximo de color rojo ($\lambda = 0,7 \mu\text{m}$) tiene un ancho angular igual a 10° . El primer máximo de la Ec.1 se encuentra cuando

$$x = 2\pi \frac{a}{\lambda} \text{sen} \theta = 5,14$$

Si reemplazamos en esta ecuación el valor de la longitud de onda del color rojo y el del ángulo $\theta = 5^\circ$ (la mitad del ancho angular) obtenemos que $a = 7$

μm , esto es el diámetro de las gotas es del orden de $14 \mu\text{m}$.

Experiencias de simulación en el laboratorio

Con una sola abertura. Los experimentos de difracción que se realizan en los laboratorios de Introducción a la Física, de nivel universitario son con rendijas iluminadas por un laser de HeNe. Para simular una corona, la rendija debe reemplazarse por aberturas circulares con diámetros de 0.10 mm ($100 \mu\text{m}$) a 0.05 mm ($50 \mu\text{m}$). En la Fig.9 se muestra el diagrama de difracción de una abertura de $60 \mu\text{m}$ de diámetro iluminado por un láser de HeNe rojo y verde y proyectados sobre una pantalla. La calidad del diagrama depende de la buena circularidad de la abertura. El ángulo de difracción se calcula mediante la geometría que se muestra en la Fig.10. La precisión

del valor calculado para el diámetro de la abertura incrementa si se miden mínimos de orden superior.

Las aberturas pueden ser iluminadas con luz blanca pero, como tienen en general una intensidad mucho más pequeña que el láser, es muy difícil ver los anillos aún en un laboratorio totalmente oscurecido.

Hay otra forma más fácil de ver la corona. Use una fuente de luz ordinaria de 100W detrás de una pantalla con un orificio de 1 ó 2 mm de diámetro o una linterna con luz LED blanca intensa (sin la lente). Algunos metros más allá del orificio o de la linterna el haz de luz es casi paralelo y se puede colocar una pantalla con un orificio muy pequeño delante de los ojos para observar directamente la corona. No usar este método para observar una fuente láser.

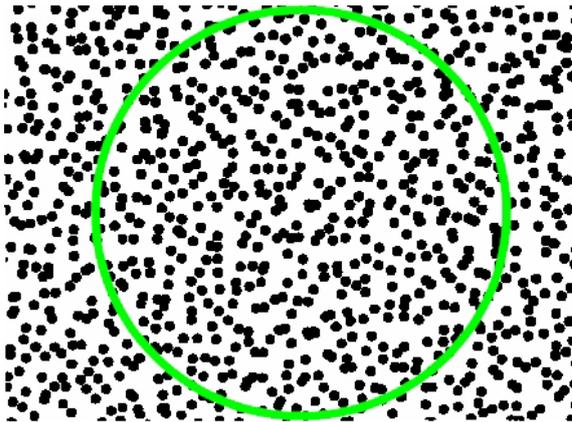


Figura 11. Discos circulares aleatoriamente distribuidos. Esta figura puede utilizarse como master para transferirlo a diapositivas. Dentro del círculo verde hay aproximadamente 500 discos.

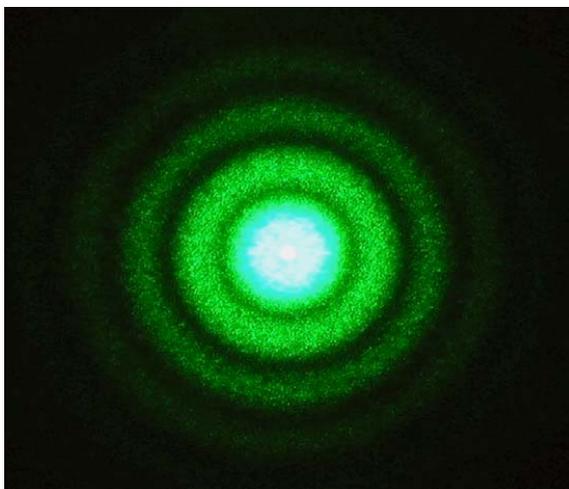


Figura 12. Diagrama de difracción que se obtiene iluminando la diapositiva de la Fig.11 con un haz láser de HeNe.

Discos circulares distribuidos al azar. Una mejor imitación de la formación de una corona por millones de gotas de las nubes se obtiene mediante la difracción de un gran número de pequeños discos negros distribuidos al azar sobre una superficie plana transparente. Se pueden generar estos discos copiando la imagen de la Fig.11 y luego imprimirla, después de reducirla adecuadamente, sobre una transparencia. Si el ancho de la imagen impresa es de 20 mm la distancia entre los discos negros es del orden de 130 μm . El tamaño del disco puede ser reducido o agrandado o estirado horizontal o verticalmente para producir deformaciones en la forma de la gota. En la imagen de la Fig.11 la distancia media entre los centros de los discos es del orden de dos veces el diámetro de los discos de modo que muchos discos son iluminados por el haz láser. A pesar de esta pequeña distancia entre los discos no es posible la difracción múltiple debido a que los discos están distribuidos sobre un plano. Las gotas de nube están separadas por una distancia mucho más grande.

Iluminando con un haz láser (verde) expandido se obtiene el diagrama de difracción de la Fig.12. El haz láser se expande haciéndolo pasar a través de dos lentes de diferentes longitudes focales separados por la suma de sus longitudes focales. La lente de longitud focal más corta debe colocarse cerca del láser. La zona central de la figura de difracción de la Fig.12

es muy brillante debido a que gran parte de la luz láser pasa a través de las partes transparentes de la diapositiva sin ser dispersadas.

Haga más diapositivas con discos de diferentes tamaños o formas no circulares. La corona también puede observarse mirando una fuente de luz blanca distante a través de las dispositivas. Otra vez se recomienda no observar un láser!

Esporas de licopodio y glóbulos rojos. En lugar de construir dispersores artificiales se puede extender sobre una platina de microscopio polvo de licopodio o glóbulos rojos. Tanto las esporas de licopodio como los glóbulos rojos son casi esféricas, con un diámetro muy uniforme,

del orden de 34 μm para el polvo de licopodio y de 8 μm para los glóbulos rojos. Si se ilumina la platina con un haz de láser expandido se observa una corona monocromática similar a la que se muestra en la las Figs.9 y 12. La calidad depende de la homogeneidad del extendido. Se pueden observar coronas observando luz blanca de la misma manera que con las diapositivas del párrafo anterior.

Gotas de agua condensadas sobre vidrio. Los anillos que se observan cuando la luz pasa a través de una placa de vidrio empañada por condensación de agua son parecidos a una corona pero hay diferencias. No está la aureola central y en muchos casos se observan rayas radiales. La diferencia se debe a que las gotas condensadas están muy próximas entre sí. La teoría que hemos utilizado supone que la luz difractada por las diferentes partículas es incoherente y por lo tanto no interfieren entre sí. Esto requiere que las partículas estén separadas al menos por 2 a 2.5 diámetros de la partícula. Las gotas de nube tienen una separación mucho más grande. Las gotas condensadas en el vidrio están mucho más próximas y se producen interferencias. Las rayas radiales se deben a la no aleatoriedad de la distribución de las gotas sobre la superficie del vidrio.

Las fotos utilizadas en este trabajo y otras de gran calidad pueden encontrarse en el sitio de la web mantenida por Les Cowley: www.sundog.clara.co.uk/atoptics/phenom.htm

El programa de simulación IRIS se encuentra en www.sundog.clara.co.uk/droplets/iris.htm

El sitio: **The optics of a water drop. Mie scattering and the Debye series**, de Philip Laven: www.philiplaven.com/index1.html, además de muy buenas fotos tiene una breve descripción de la teoría del scattering Mie.

L. Cowley, P. Laven y M. Vollmer, han publicado recientemente en Physics Education un excelente artículo sobre estos temas: *Rings around the sun and moon: coronae and diffraction*, 40(1), 2004, 51-59.

ANEXO



Medición del radio de los anillos con una ballesta

La ballesta es básicamente una regla graduada curva que está fijada en el extremo de una barra recta de madera (figura de la izquierda). La ballesta se diseña habitualmente de modo que cuando se observa que dos objetos están separados por 2 cm sobre el arco de la ballesta, entonces estos dos objetos están separados por un grado. Al hacer esta medición se tiene que mantener la base de la barra apropiadamente apoyada en contra del pómulo como se muestra en la figura de abajo.

