

Estructura interna de una pluma de ave mediante difracción y microscopía.

Hugo Pérez García,¹ Rafael Garcia Molina,¹ Isabel Abril²

*¹Departamento de Física – Centro de Investigación en Óptica y Nanofísica,
Universidad de Murcia;*

²Departament de Física Aplicada, Universitat d'Alacant;

RESUMEN

Se presenta una experiencia de difracción para realizar en los primeros cursos universitarios o en los últimos de enseñanza secundaria. Consiste en el estudio cualitativo y cuantitativo del patrón de difracción producido por una luz de láser al atravesar una pluma de ave. Midiendo el espaciado entre los puntos máximos de luz que se observan experimentalmente se obtiene el parámetro de red correspondiente a la estructura interna de la pluma. También, se comparan estos resultados con los obtenidos mediante el uso de un microscopio electrónico. La sencillez en la realización de esta actividad, junto con la facilidad para encontrar los materiales necesarios y el buen acuerdo entre los resultados obtenidos por difracción y por microscopía, convierten esta experiencia en un excelente recurso didáctico.

Palabras clave: Difracción, física, láser, experiencias.

1. INTRODUCCIÓN

Por todos es sabido que el empleo de materiales cotidianos para la realización de experiencias de física, en general, y de óptica en particular (Pérez Lozada y Falcón 2009), es recibido positivamente por los estudiantes. La utilización de sofisticados materiales de laboratorio es algo que el alumno espera encontrar en una universidad, sin embargo, aprecian más las experiencias que se pueden hacer con materiales normales y corrientes pues con ellos, no sólo están realizando una práctica de laboratorio, sino que están adquiriendo un recurso para poder experimentar e investigar por si mismos con total autonomía, ya sea en sus hogares o desde otra ubicación (García Molina R., 2011).

Por ello, en esa comunicación vamos a proponer realizar experiencias de difracción con materiales cotidianos como pueden ser un CD-DVD, un colador metálico o una trama de tejido por dar algunos ejemplos, pero donde realmente nos vamos a centrar es en una pluma de ave, aunque el estudio que haremos será trasladable a cualquiera de estos otros objetos.

Para aportar un dato curioso, diremos que es precisamente una pluma de ave la que es considerada como la primera red de difracción de la historia. El descubridor fue el científico escocés James Gregory (1638-1675) en 1673, que descubrió que al mirar el Sol a su través aparecían unos curiosos colores. Lo que estaba ocurriendo es que la pluma está compuesta por un conjunto de ramificaciones paralelas llamadas barbas y bárbulas. Cuando la luz pasaba a través de este entramado, la pluma se comportaba como una red de difracción separando las diferentes longitudes de ondas del espectro visible.

La practica que proponemos puede hacerse de forma cualitativa de dos maneras diferentes, la primera de ellas es reproduciendo el experimento que llevó a cabo James Gregory hace más de 300 años, y la segunda proyectando el espectro de difracción que produce la pluma cuando es atravesada por la luz monocromática de un puntero láser. Pero también puede realizarse medidas del espaciado entre puntos máximos de luz del espectro de difracción que permitan relacionarlos con la longitud de onda de la luz y la distancia entre la pluma y la pantalla, para obtener de esta manera la separación entre barbas y bárbulas, magnitud que será considerada en adelante como el parámetro de red. Es este segundo método cuantitativo el que vamos a desarrollar a continuación como propuesta para realizar en el aula en los primeros cursos universitarios de ciencias.

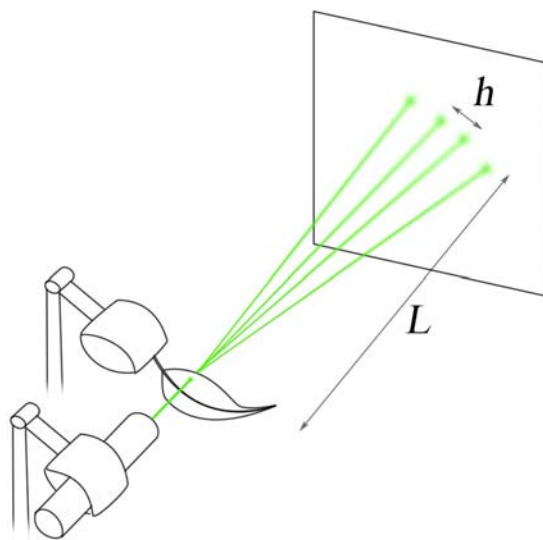


Figura 1. (Izq.) En la representación esquemática del montaje experimental se indica la distancia L entre la pluma y la pantalla, así como la separación h entre los diversos puntos luminosos y el punto central del patrón de difracción. (Der.) El montaje experimental para la difracción de la luz de un láser a través de una pluma de ave estaba formado por los siguientes materiales: soportes, puntero láser, pluma (de pato, recogida en un estanque), cinta métrica y pantalla; sobre el suelo del pasillo se aprecia la cinta métrica usada para medir la distancia entre la pluma y el patrón de difracción, que se forma en la pantalla situada al fondo de la imagen.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo experimental utilizado en esta experiencia se muestra en la derecha de la figura 1, que consiste en esencia en un puntero láser iluminando una pluma de ave, junto con una pantalla (una pared blanca puede servir) para proyectar el patrón de difracción; La representación esquemática de dicho dispositivo aparece en la parte izquierda de la figura 1. Advertimos que es importante que la luz del puntero láser incida perpendicularmente sobre la pluma.

Tal como se muestra en la figura 2, al observar en la pantalla donde se proyecta el haz veremos que aparecen dos subpatrones de difracción, cuyos máximos se hallan equiespaciados a las distancias $h1$ y $h2$, respectivamente. Las medidas de las distancias $h1$ y $h2$ se realizaron *in situ*, para diferentes valores de la distancia L entre la pluma y la pantalla.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

El fenómeno de la difracción y su fundamentación teórica ya aparecen expuestos en algunos libros de texto de Bachillerato y en textos correspondientes a los primeros cursos universitarios (Sears et al. 2004, Tipler y Mosca 2005) donde puede encontrarse una discusión más detallada de la difracción. Sin embargo, para el propósito de este trabajo, simplemente nos limitaremos a recordar la relación que hay entre la separación d de las aberturas de la red de difracción (correspondientes al parámetro de red), la longitud de onda λ de la luz y el ángulo θ respecto de la dirección de incidencia de la luz que subtienden los puntos luminosos del patrón de difracción:

$$d \sin \theta = n \lambda, \text{ (donde } n \text{ es un entero)} \quad (1)$$

Como el ángulo θ es muy pequeño con el montaje experimental que se ha planteado, tiene sentido emplear la aproximación paraxial: $\sin \theta \approx \tan \theta = h/L$. Donde L es la distancia entre la red de difracción y la pantalla en la que se recoge el patrón de difracción; h es la separación entre el punto luminoso central (que es el más intenso) y el punto que subtiende el ángulo θ .

Podemos reescribir la ecuación (1) para el máximo de orden $n=1$ en la forma

$$\frac{h_i}{\lambda} = \frac{L}{d_i}, \quad (2)$$

donde el subíndice i ($=1, 2$) se refiere a cada uno de los subpatrones que aparecen en la figura 2, debidos a los parámetros de red que se muestran en la figura 3. Ésta es una fotografía realizada mediante microscopía electrónica donde se puede apreciar nítidamente que la pluma consta de barbas (separadas por una distancia d_1) y bárbulas (equiespaciadas por d_2).

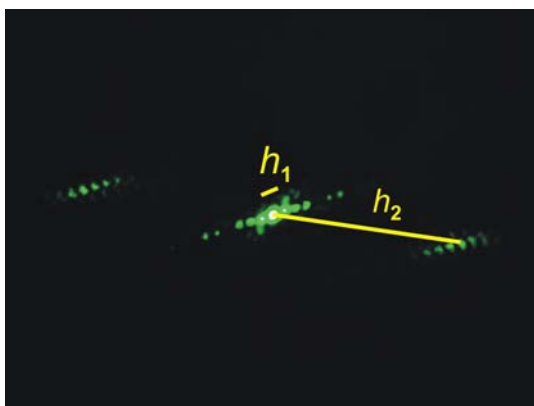


Figura 2. Al iluminar la pluma con un láser verde, aparece en la pantalla este patrón de difracción. Puede observarse claramente que hay dos subpatrones con separaciones características h_1 y h_2 entre los puntos luminosos.

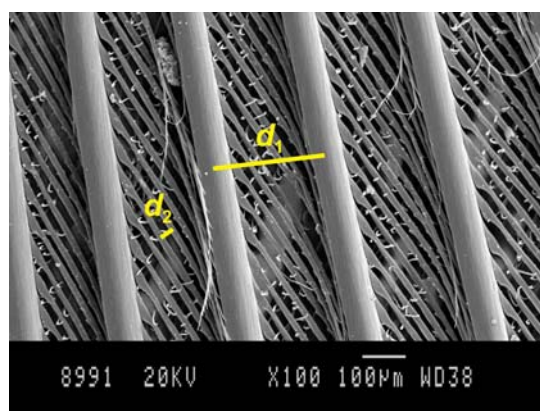


Figura 3. Pluma de pato vista a través del microscopio electrónico, realizado en los servicios de microscopía electrónica de la Universitat d'Alacant. Las distancias d_1 y d_2 corresponden a las separaciones entre las barbas y entre las bárbulas, respectivamente.

4. RESULTADOS

En primer lugar determinamos los espaciados d_1 y d_2 a partir de medidas realizadas directamente sobre la fotografía tomada con el microscopio electrónico (figura 3), para hacernos una idea del orden de magnitud del que saldría los parámetros de red al hacer la experiencia de difracción. Como es fácil deducir de la figura 3, los valores que se obtienen varían según la zona en la cual se realiza la medida (y también según la pluma que se emplee, aunque pertenezca al mismo tipo de ave. Por este motivo, es necesario aplicar un tratamiento estadístico de minimización de errores, que ha consistido en medir reiteradamente la distancia entre varias barbas adyacentes, en imágenes con diferentes escalas; con las bárbulas se ha procedido de forma análoga. Con fin de remarcar este hecho, presentamos en la figura 4 dos histogramas sobre los valores que se obtienen al medir la separación entre barbas y bárbulas (d_1 y d_2 respectivamente) con el microscopio electrónico. El resultado presentado en la tabla 1 es el promedio de todas las medidas efectuadas (bien para las barbas o bien para las bárbulas), cuya desviación estándar se ha tomado como error.

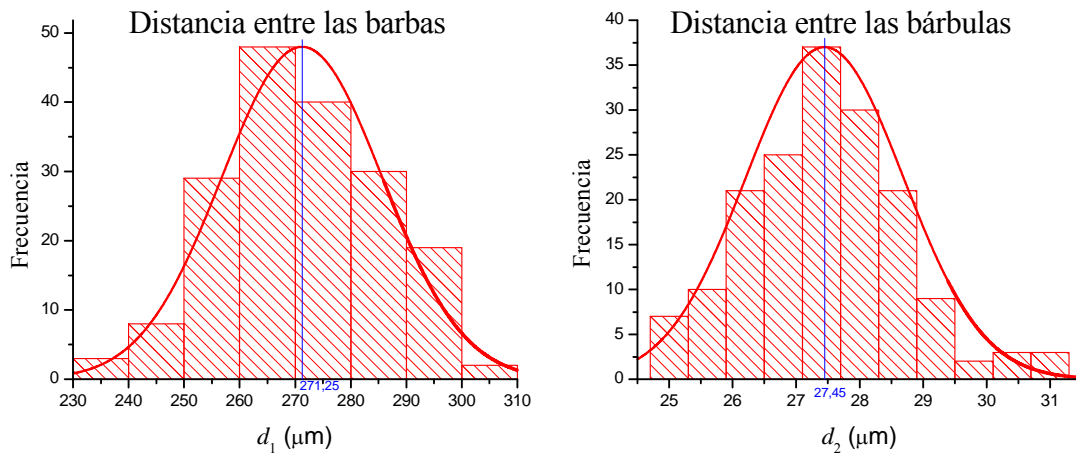


Figura 4. Histogramas de las medidas tomadas directamente con el microscopio electrónico de la distancia entre barbas (panel de la izquierda) y bárbulas (panel de la derecha) de una pluma de ave. La curva superpuesta sobre los histogramas es una gaussiana cuyo centro y anchura corresponden con la media y la desviación estándar del conjunto de medidas.

Para realizar la experiencia de la difracción se utilizó inicialmente un láser verde ($\lambda=532$ nm), uno rojo ($\lambda=630$ nm) y posteriormente uno azul ($\lambda=405$ nm). La distancia L desde la pluma hasta la pantalla se midió con una cinta métrica (tal como se aprecia en el panel derecho de la figura 1), mientras que las separaciones h_1 y h_2 entre los

puntos luminosos de cada subpatrón de difracción (como los mostrados en la figura 2) se midieron con un doble decímetro directamente sobre la pantalla.

En la figura 5 se ha representado los datos obtenidos mediante la difracción a través de las barbas y de las bárbulas. El color de los símbolos ha sido escogido de forma que denote el láser que fue utilizado. Debido a la proximidad de las medidas entre si, se ha representado con símbolos huecos para evitar que los datos obtenidos con un láser oculten los tomados por otro.

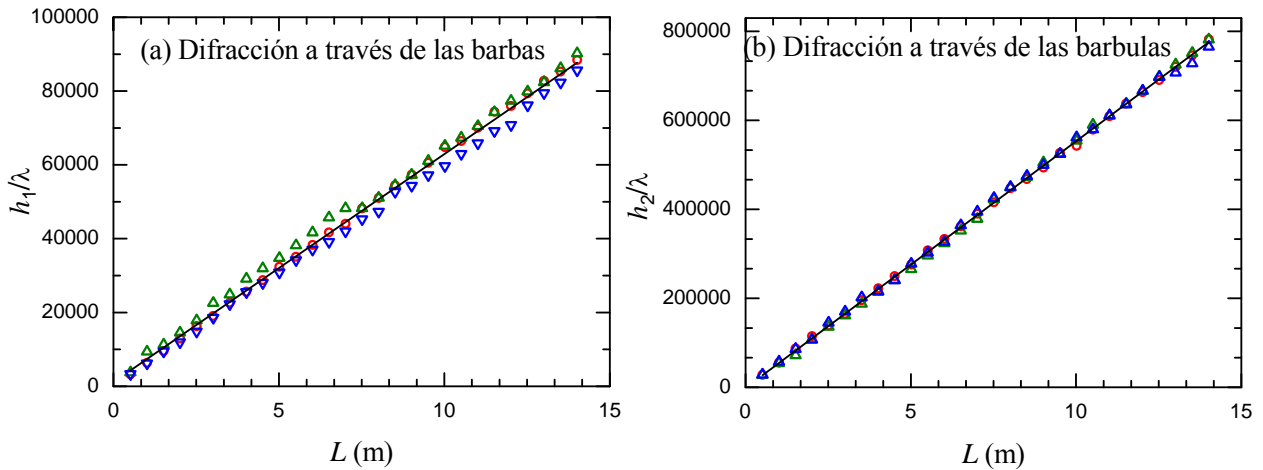


Figura 5. Representación de la separación entre los máximos de primer orden del patrón de difracción (normalizados a la longitud de onda del láser empleado) en función de la distancia L . Las medidas correspondientes a las barbas aparecen en el panel izquierdo (a), y las de las bárbulas en el derecho (b)

De la realización de un ajuste lineal para cada conjunto de datos (representado mediante sendas rectas negras en cada gráfica) y extrayendo la pendiente de acuerdo con la ecuación (2), se obtuvieron los valores de las separaciones entre las barbas (d_1) y entre las bárbulas (d_2) que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Separaciones d_1 y d_2 entre las barbas y entre las bárbulas de una pluma de ave, obtenidos mediante diversos procedimientos. Los valores de la primera columna se obtuvieron a partir del ajuste lineal a los datos obtenidos mediante difracción (figura 5), mientras que los valores de la segunda columna proceden de las medidas directas efectuadas sobre la imagen obtenida con el microscopio electrónico (figura 3)

| | Microscopía electrónica | Difracción |
|-------------------------|-------------------------|------------------|
| d_1 (μm) | 270 ± 15 | 162.0 ± 1.3 |
| d_2 (μm) | 27.5 ± 1.5 | 18.03 ± 0.05 |

A la vista de estos datos, se podría pensar que los resultados que se obtienen de la medida de la separación de las barbas y las bárbulas por los dos métodos descritos no casan entre sí. A pesar de ello, el orden de magnitud de los resultados es compatible en todos los casos (unos pocos centenares de micras para la separación entre barbas, y unas pocas decenas de micras para la separación entre las bárbulas) y la fluctuación de valores no es más que una consecuencia de la naturaleza estadística de la estructura de la pluma.

A fin de completar el estudio de difracción, se compara el ángulo que forman las barbas y las bárbulas de una pluma entre sí, con el ángulo que forma los subpatrones de difracción (Figura 6)

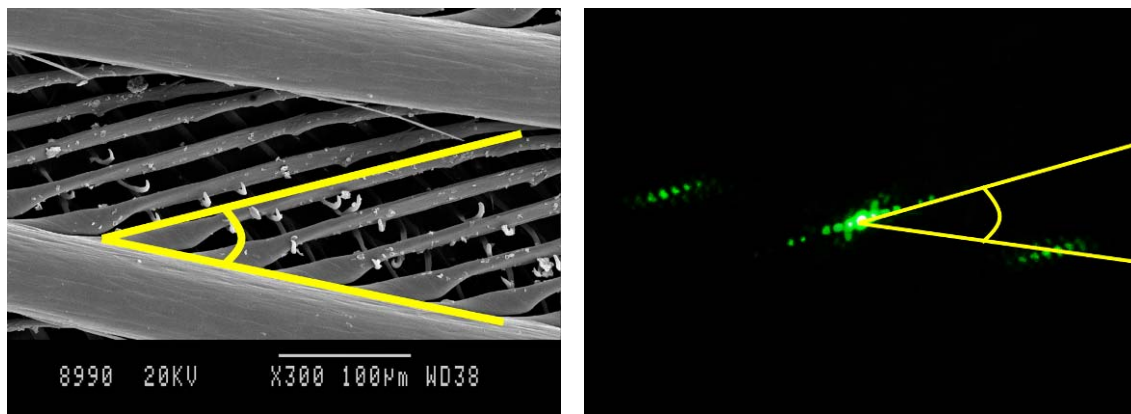


Figura 6. (Izq.) Ángulo que subtienden los subpatrones de difracción, quedando los ejes delimitados por los máximos de luz. (Der.) Fotografía de una pluma de ave vista al microscopio en la que se muestra el ángulo que forman las barbas y las bárbulas entre sí.

Para realizar las medidas del ángulo formado por los máximos de difracción de los subpatrones se emplea el láser verde que utilizamos anteriormente y un transportador de ángulos que se colocaba directamente sobre la pantalla. Para mitigar el error experimental, se realizó varias medidas en las que se variaba la separación L de la pluma a la pantalla. Por otro lado, las medidas del ángulo formado entre las barbas y las bárbulas de la pluma se midieron por medio de un software de diseño gráfico sobre las imágenes obtenidas al microscopio electrónico. Debido a que la estructura interna de la pluma es irregular, el ángulo entre las barbas y las bárbulas no es siempre el mismo, por lo que resulta necesario hacer bastantes medidas para reflejar este hecho. Con esta intención y para poder comparar los ángulos aportamos los histogramas que se muestran en la figura 7. Por último, mostramos en la tabla 2 los valores estimados para los dos ángulos, viendo como no podía ser de otra manera que el ángulo que se forma en ambos casos es el mismo.

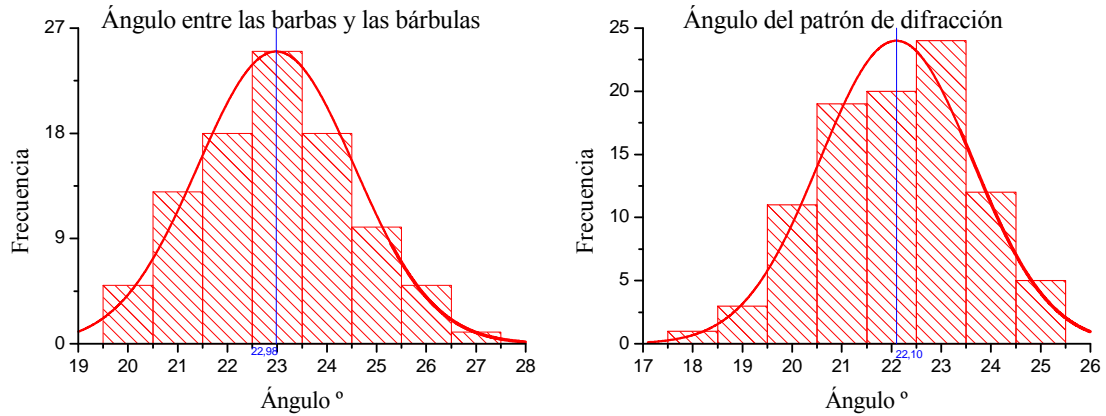


Figura 7. (Izq.) Histograma de las medidas del ángulo que forman las barbas y las bárbulas de una pluma vista a través de un microscopio electrónico. (Der.) Conjunto de medidas del ángulo formado por los máximos de difracción de los subpatrones de difracción (formados en una pantalla al ser iluminada con la luz de un puntero láser que ha atravesado previamente una pluma de ave). En ambos casos se ha superpuesto la curva correspondiente a una distribución normal cuya media y varianza son las que se obtienen del análisis estadístico al que se ha sometido nuestra muestra de valores.

Tabla 2. Comparación de los valores obtenidos en la medida del ángulo entre barbas y bárbulas vistas al microscopio, con el ángulo que aparece en el patrón de difracción.

| | Microscopía electrónica | Difracción |
|-------------------------|-------------------------|----------------|
| d_1 (μm) | 23.0 ± 1.6 | 22.1 ± 1.5 |

5. CONCLUSIONES

Hemos presentado una experiencia que pone de manifiesto la difracción de la luz al atravesar una pluma de ave, lo cual resulta sorprendente y, al mismo tiempo, motivador para los estudiantes. Esta actividad puede realizarse de forma cualitativa, sin más que mostrar el patrón de difracción y también cuantitativa, estudiando la separación de los máximos de luz tal como se ha descrito. Si se opta por esta última opción, se obtiene unos resultados que muestran un acuerdo satisfactorio con las separaciones típicas de las barbas y de las bárbulas de una pluma de ave.

El objetivo de esta experiencia no es proponer un método para caracterizar la estructura de una pluma, sino poner de manifiesto el fenómeno de la difracción con un material cotidiano (como una pluma de ave). Por ello puede implementarse en los primeros cursos universitarios, ya que se adapta perfectamente al currículum de la materia de física.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cortel Ortuño A. (1997) *Las ondas. La luz y el sonido*. Barcelona. ICE Universitat de Barcelona. Exp. 12.14.
- García Molina R. (2011): Ciencia recreativa: un recurso didáctico para enseñar deleitando. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 8 (Núm. Extraordinario) 370-392. <http://rodin.uca.es:8081/xmlui/handle/10498/14541>
- Meiners H. F. (1970) *Physics Demonstration Experiments*, 2 vols. New York. The Ronald Press Company. Secc. 36-5.2.9 Two dimensional gratings.
- Pérez García H., García Molina R., Abril I. (2012) Difracción de la luz a través de una pluma de ave. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 9(1), 164-169.
- Pérez Lozada E., Falcón N. (2009) Diseño de prototipos experimentales orientados al aprendizaje de la óptica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 6, 452-465.
- Sears F. W., Zemansky M. W., Young H. D., Freedman R. A. (2004) Física universitaria, 11ª ed., 2 vols. México. Pearson Educación.
- Senar J. C. (2004) La importancia del plumaje: algunas nociones generales. Cap. 1 en *Monografies del Museu de Ciències Naturals*, Vol. 2. Mucho más que plumas. Barcelona. Museu de Ciències Naturals. <http://www.raco.cat/index.php/MonografiesMCN/issue/view/6822>
- Tipler P. A., Mosca G. (2005) *Física para la Ciencia y la Tecnología*, 5ª ed, 2 vols. Barcelona. Reverté.
- Wikipedia (2012) Feather. <http://en.wikipedia.org/wiki/Feather>