

Determinación experimental del parámetro de red de una pluma mediante difracción ¹

Measurement of the lattice parameter of a feather using the diffraction method

María Martínez Pallarés
IES Prado Mayor, Totana, Murcia

Este trabajo presenta el diseño e implementación de una experiencia didáctica que permite estudiar el fenómeno de difracción de la luz a través de una pluma. Las mediciones de la separación entre los máximos brillantes del patrón de difracción originado cuando la pluma es atravesada por un láser han servido, a su vez, para proponer un método que permite caracterizar, de forma cuantitativa, la estructura básica de la pluma mediante la obtención del espaciado entre las barbas y bárbulas de la misma. Además, con el objetivo de que los resultados obtenidos fueran precisos, se ha realizado un calibrado del instrumental utilizado y por último, se ha usado un microscopio óptico para validar las mediciones realizadas con el método de difracción. Los resultados obtenidos por ambos métodos están en excelente acuerdo entre sí y con los datos bibliográficos de trabajos anteriores. Esto convierte a este método en una técnica adecuada y fiable para la caracterización y determinación de los parámetros de red de una rejilla de difracción cualquiera.

Palabras clave: Difracción, láser, pluma, red, patrón de difracción.

This paper presents the design and the implementation of a didactical experience that allows the study of the phenomenon of light diffraction through a feather. The measurements of the separation between the bright maxima of the diffraction pattern, that is originated when the plume is shined with a laser, have been used to propose a method that will enable us to characterise, in a quantitative way, the basic structure of the feather by obtaining the spacing between its barbs and barbules. In order to make sure that the obtained results were accurate, we calibrated the instruments and, finally, we used an optical microscope to confirm the measurements made with the diffraction method were correct. The results obtained by both methods are in excellent agreement with each other and with the bibliographic data of previous works. This makes this method a suitable and reliable technique for the characterisation and determination of the lattice parameters of any diffraction grating.

Keywords: Diffraction, laser, feather, lattice, diffraction pattern.

¹ Este trabajo fue seleccionado para participar en URANIA, II Congreso Navarro de Jóvenes Investigadores, celebrado en Tudela los días 13, 14 y 15 de junio de 2022, obteniendo un Tercer Premio concedido por la organización.

Justificación

Desde la Antigüedad, la escurridiza naturaleza de la luz dio lugar a la que probablemente haya sido la mayor y más duradera controversia de la historia de la ciencia. Tanto los filósofos de la Antigua Grecia como los expertos en mecánica cuántica de la actualidad, han quedado cautivados con las propiedades de la luz y han tratado de desvelar los misterios de una extraña entidad, que, si bien está presente a nuestro alrededor, permaneció latente al entendimiento físico y matemático con propiedades extraordinarias que escapan al sentido común y cuyo completo entendimiento requirió siglos y a las mentes más brillantes de la historia de la física. Este esfuerzo no fue en vano pues permitió comprender fenómenos como la absorción y emisión de fotones en un átomo o la interferencia y difracción de las ondas luminosas.

Este último punto es precisamente el objeto de estudio de este trabajo. En 1912, Von Laue concibió la revolucionaria idea de emplear un cristal como rejilla de difracción para los rayos X. Desde entonces, la difracción de rayos X se ha convertido en una valiosa herramienta para estudiar la estructura de cristales y moléculas complejas. Sin embargo, a pesar de su enorme importancia en los ámbitos científicos, las técnicas de difracción de rayos X requieren materiales sofisticados, caros y potencialmente peligrosos, que resultan difíciles de integrar en laboratorios de institutos o universidades. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño de un simulador de la difracción de rayos X por una pluma.

En efecto, en muchos campos de la ciencia, el diseño de simuladores se ha convertido en una práctica habitual para recrear, de manera controlada y segura, las condiciones de otro experimento cuya ejecución podría resultar muy costosa o compleja. Quizá uno de los ejemplos más conocidos de simulador sea el del túnel de viento, en el que se estudia la eficiencia aerodinámica y la resistencia de aviones y aeronaves. En nuestro caso, se reemplazará la radiación X por otra de menor frecuencia, la luz de un puntero láser y se sustituirá la red tridimensional cristalina por una pluma de gallina. Dado que la luz de un láser y el tejido de la pluma de gallina sufren una interacción de naturaleza muy diferente a la experimentada por los rayos X y el cristal, no será posible estudiar el factor estructural de disposición y ordenación de los átomos, pero sí será posible efectuar una experiencia cuantitativa y cualitativa que permitirá obtener el factor de forma de la difracción y las características esenciales de la estructura de la pluma y que servirá como propuesta para realizar en el aula en el último curso de Bachillerato.

Este proyecto de investigación pretende dar respuesta a los siguientes interrogantes:

- ¿Es posible determinar las características morfológicas y estructurales de una pluma utilizando el fenómeno de difracción que experimenta un láser al atravesarla?
- ¿Se observan diferencias en los patrones de difracción originados por láseres de distinta longitud de onda?
- ¿Son las mediciones obtenidas por el método de difracción compatibles con las obtenidas por microscopía?

El primer trabajo que menciona el uso de las plumas como redes de difracción es el realizado por Hugo Pérez García en su artículo (Pérez, 2011): "Difracción de luz a través de una pluma de ave" Este estudio, al igual que el

nuestro, efectúa medidas cuantitativas del espaciado entre barbas y bárbulas de una pluma. Sin embargo, el trabajo que a continuación se presenta, realiza, además, una calibración del instrumental utilizado y usa un programa informático para analizar y procesar imágenes y datos. Estos cambios y novedades suponen una mejora respecto al trabajo comentado pues permiten obtener mediciones con mayor número de cifras significativas y reducir considerablemente el intervalo de error.

Hipótesis y objetivos

El objetivo principal de la práctica es realizar un estudio cuantitativo y cualitativo del patrón de difracción originado por una pluma. Así, de igual forma que mediante la difracción de rayos X es posible determinar la disposición y las distancias entre los átomos de una estructura cristalina, esta experiencia cuantitativa tendrá como objetivo determinar la separación entre las barbas y bárbulas de una pluma y con ello, sus características morfológicas esenciales. La experiencia cualitativa, por su parte, permitirá estudiar las cualidades y diferencias entre los patrones de difracción que se generan con láseres de distinta longitud de onda. Además, para calibrar los punteros láser utilizados, se utilizará nuevamente el método de difracción y se medirá la longitud de onda de cada uno de ellos haciendo uso de un DVD con un parámetro de red conocido. Por último, se utilizará un microscopio óptico para validar la medición obtenida para las barbas y bárbulas mediante el patrón de difracción.

Las hipótesis planteadas han sido:

- Los patrones de difracción evidencian la existencia de una estructura periódica y ordenada en la pluma.
- La separación entre barbas y bárbulas de la pluma no depende de la longitud de onda de la radiación incidente ni de la distancia a la que se registra el patrón de difracción.
- Al aumentar la distancia desde la pluma a la pantalla, también lo hace la separación entre los máximos de difracción.
- Al aumentar la longitud de onda del láser incidente, también lo hace la distancia entre los máximos del patrón de difracción.

Metodología

La técnica de recolección de datos empleada se basa en la observación directa del fenómeno de difracción a través de un disco DVD y de plumas de gallina. Para realizar la experiencia, se utilizarán tres punteros láser, uno rojo de $\lambda = 650 \text{ nm}$, uno verde de $\lambda = 532 \text{ nm}$ y otro azul de $\lambda = 405 \text{ nm}$.

En la figura 1, se muestra el dispositivo experimental utilizado para realizar la experiencia con la pluma. Este consta, en esencia, de una fuente láser que proyecta una onda monocromática sobre una rejilla de difracción, la pluma de ave, formando al hacerlo un patrón de interferencia en una pantalla distante, en este caso, una puerta sobre la que se ha dispuesto una cartulina negra para facilitar la observación del fenómeno de difracción. El puntero láser se apoya sobre una base fija, un trípode, y se hace incidir su luz de forma perpendicular al arreglo de fibras de la pluma, situado en la parte anterior del trípode

y cuyo cálamo se clava en una base de plastilina que garantiza su sujeción. La pluma o el objeto que origina la difracción se podría colocar en cualquier soporte con la condición de que se mantenga en una posición fija.

Entre el trípode y la pantalla de observación, se coloca un soporte, fabricado artesanalmente a partir de un listón de madera, que actúa como base de la estructura, al que se han acoplado, por ambos lados, dos tablas de madera, perpendiculares a la base y paralelas entre sí. Sobre el listón de la base y en el espacio remanente entre las dos tablas de madera, se dispone una tercera, de menor altura que las anteriores y que al tener el mismo grosor que el listón, queda perfectamente incrustada en la estructura por medio de dos sargentos y gomas elásticas. Como consecuencia de la menor altura del último listón, queda un hueco entre las dos tablas de madera que servirá para colocar un teléfono móvil, con ayuda de gomas elásticas, desde el que se tomarán fotos de los patrones de difracción observados en la pantalla. Una vez dispuestos todos los elementos, se rodeará el láser con una goma elástica para mantener presionado el botón que lo enciende y se instalará una cinta métrica sobre el suelo del pasillo para medir la distancia entre la rejilla de difracción y la pantalla donde se registra el patrón de interferencia.

Figura 1. Dispositivo experimental utilizado en la experiencia con la pluma (arriba) y representación esquemática (debajo).



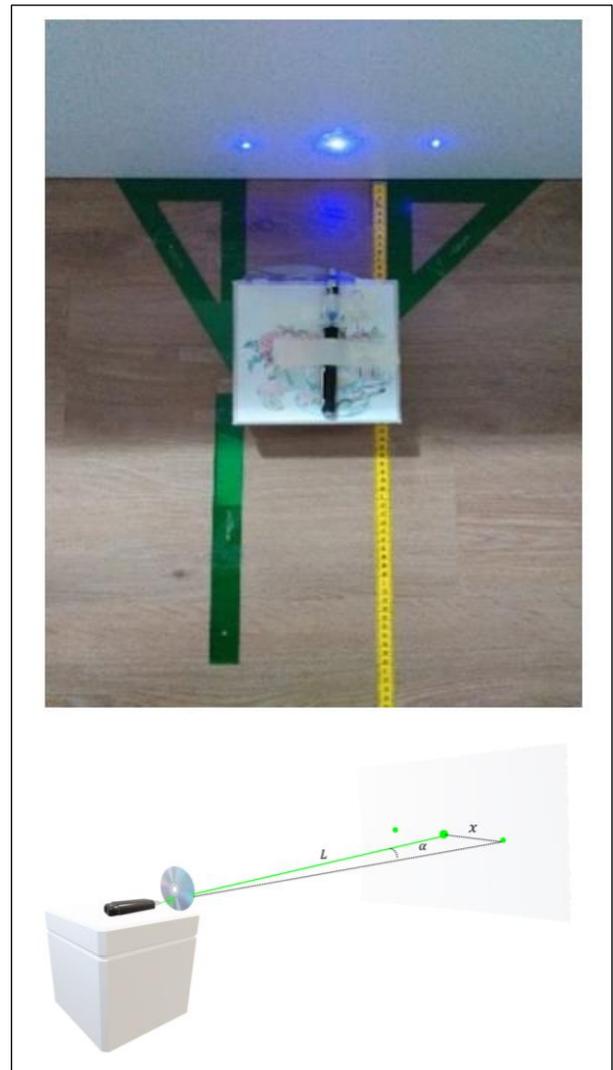
Fuente. Elaboración propia.

Para realizar la experiencia de difracción con el DVD no fue posible utilizar el dispositivo experimental previamente detallado debido a la mayor amplitud del patrón de difracción registrado en la pantalla. Por ello, fue

necesario disponer los elementos en un espacio reducido con distancias y tamaños menores.

En la Figura 2, se muestra el dispositivo experimental utilizado para la experiencia del DVD. Consta, en esencia, de los mismos elementos que el dispositivo utilizado para la pluma: un láser que proyecta una onda monocromática sobre una rejilla de difracción, el DVD, formando al hacerlo un patrón de difracción en una pantalla. El puntero láser se apoya sobre una superficie fija, una caja, y su luz incide de forma perpendicular al disco, que permanece adherido a la parte anterior de la caja. Con el objetivo de que la caja fuera perpendicular a la pantalla, se disponen, a ambos lados de ésta, una escuadra, una regla y un cartabón. Por último, se encaja el láser en una pinza para mantener presionado el botón de encendido y se instala una cinta métrica sobre el suelo para medir la distancia entre el disco y la pantalla donde se registra el patrón de interferencia.

Figura 2. Dispositivo experimental utilizado en la experiencia con el DVD (arriba) y representación esquemática (debajo).



Fuente. Elaboración propia.

Fundamento teórico

El fenómeno de difracción consiste, en esencia, en una desviación que experimentan las ondas bidimensionales y

tridimensionales cuando atraviesan una abertura angosta o rodean el borde de un obstáculo que se interpone en su trayecto. Al hacerlo, se pone de manifiesto el fenómeno de difracción, que tiene como resultado la formación de un patrón de claros y oscuros constituido por franjas brillantes, resultantes de la interferencia constructiva entre las ondas difractadas y franjas oscuras, que aparecen como consecuencia de la anulación mutua de las ondas. En este punto, cabe destacar que el fenómeno de difracción se produce para cualquier tipo de onda y es más acentuado cuando el tamaño de la abertura es del orden de la longitud de onda de la radiación difractada.

En el caso de la luz, es posible visualizar el fenómeno de difracción a simple vista, acercando los dedos índice y pulgar delante de un foco de luz. Al hacerlo, se observan unas líneas oscuras, paralelas a los dedos, que crean la sensación de que los dedos se están tocando, cuando realmente están separados. Estas líneas oscuras son patrones de difracción que origina la luz al pasar por la estrecha abertura que dejan los dedos. También se puede observar la difracción de la luz a través de una malla de tejido, con un colador, con un disco óptico y con una pluma de ave.

Estos últimos son ejemplos de las llamadas redes de difracción. Una rejilla o red de difracción consiste en una serie de ranuras paralelas del mismo ancho e igualmente espaciadas. Cuando la luz incide sobre estas ranuras, cada punto de la rejilla se convierte en un foco emisor de ondas secundarias que emergen de la misma estando en fase e interfieren con las procedentes de otra parte de la rejilla dando lugar al patrón de interferencia final. Las ondas emergentes de las diferentes ranuras de la rejilla recorren distancias distintas antes de llegar a la pantalla. Si la diferencia de camino es un múltiplo entero de la longitud de onda, las ondas llegan a la pantalla en concordancia de fase y se produce interferencia constructiva, una franja brillante; sin embargo, si las distancias recorridas por ambas ondas difieren en media longitud de onda, las ondas llegan a la pantalla en oposición de fase y se produce interferencia destructiva, una franja oscura. La siguiente ecuación analiza este último caso:

$$d\theta = n\lambda \text{ donde } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Cuando el ángulo θ es muy pequeño, lo que sucede en la experiencia realizada con la pluma, es posible aplicar la aproximación $\theta = \tan \theta = \frac{x}{L}$, donde x es la separación entre las franjas brillantes del patrón de difracción y L es la distancia de la pluma a la pantalla. Así, la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$d \frac{x}{L} = n\lambda$$

Donde x es la distancia entre los máximos; n es un entero, que, en este caso, adoptará valores comprendidos entre 1 y 3, ya que se efectuarán medidas para los máximos de primer, segundo y tercer orden; L es la distancia entre la pluma y la pantalla de observación, d es la distancia entre las barbas o las bárbulas y λ corresponde a la longitud de onda que se obtendrá mediante el calibrado del puntero láser.

Con la relación obtenida será posible determinar la separación d entre las barbas y bárbulas de la pluma, magnitud conocida como parámetro de red, midiendo la distancia entre los máximos del patrón observado.

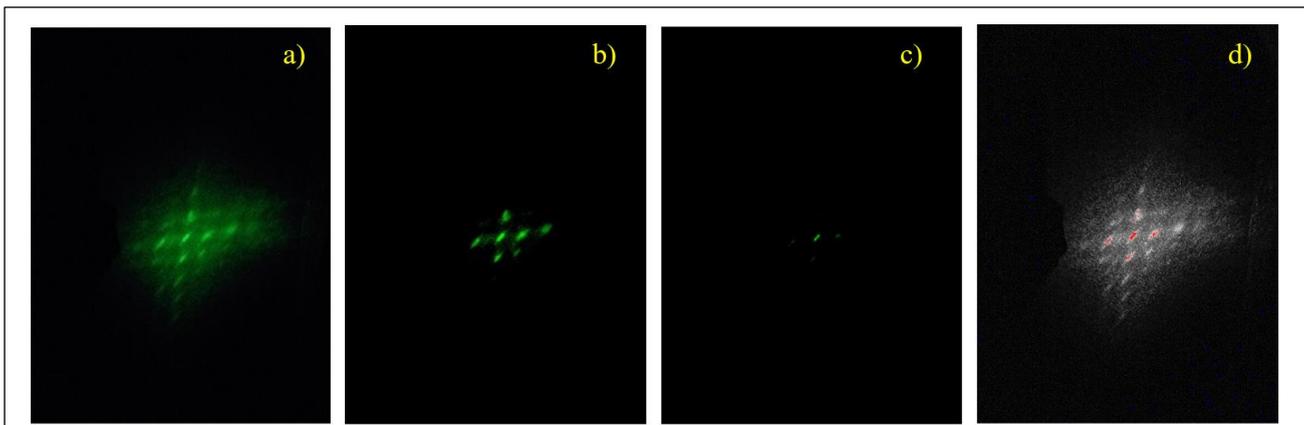
Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para lograr los objetivos del proyecto, será necesario medir la distancia x entre los puntos luminosos y el máximo central del patrón de difracción. En ocasiones, puede ser difícil determinar con seguridad cuál es el máximo central o punto más brillante del patrón de difracción. Una forma de conseguirlo es comprobar que el supuesto máximo central coincide con la zona donde se proyecta el haz del láser cuando no está la pluma o el disco. Otra manera de visualizarlo es verificar que el patrón originado es simétrico respecto al máximo central a ambos lados y arriba y abajo.

Una vez identificado el máximo central, se colocará cinta de carroceros sobre el patrón originado y en ella se marcará, con un lápiz, la ubicación del máximo central y la de los puntos luminosos adyacentes, llamados máximos de orden primero, segundo, tercero y así sucesivamente, dependiendo de su posición respecto al máximo central. Posteriormente, se anotará, sobre la cinta, la distancia a la que se encuentra la pluma o el disco de la pantalla en el momento de la medición y se trasladará a un folio donde se procederá a determinar, con una regla milimetrada, las distancias entre el máximo central y los puntos luminosos. Con el objetivo de minimizar el error cometido, se efectuarán múltiples mediciones con los distintos punteros láser y en las que variará la distancia de la pluma a la pantalla.

Figura 3. Proceso de ajuste de brillo y contraste de una fotografía del patrón de difracción.

Fuente. Elaboración propia.



Tras numerosas mediciones, se concluyó que el método de medición anterior era un tanto impreciso para los patrones de difracción originados por las plumas, ya que, en ocasiones, los máximos de primer y segundo orden apenas se conseguían visualizar y aparecían en la pantalla como manchas de color borrosas y alargadas en las que no se podía determinar la ubicación del punto más brillante. Al contrario, en los patrones originados por el disco, la estructura perfectamente periódica de las pistas produce máximos de difracción bien definidos y nítidos, por lo que, para la experiencia del DVD, fue posible utilizar el primer método descrito.

Para solventar el problema descrito en el caso de los patrones originados por las plumas, se descartaron las mediciones *in situ* y se procedió a utilizar un programa informático de tratamiento de imágenes, *ImageJ*. Con este programa, fue posible ajustar el contraste de las imágenes con el objetivo de que sólo fueran visibles los puntos brillantes del patrón, de manera que se pudieran efectuar mediciones mucho más precisas, que fueron también realizadas con este programa.

Para medir las distancias entre los máximos del patrón, fue necesario, en primer lugar, calibrar espacialmente las imágenes. El objetivo de la calibración espacial de una imagen es establecer una relación entre las mediciones realizadas en la imagen y las dimensiones reales de la distancia que se mide. Para ello, se tomó como referencia una fotografía de la cartulina con una regla milimetrada de 30 cm, que se utilizó como escala de calibración. Una vez insertados los valores de calibración y obtenida la escala correspondiente, se procedió a medir la distancia x_1 para determinar la separación entre barbas y la distancia x_2 , para obtener la distancia entre bárbulas.

Por último, para evaluar y dar validez a los resultados obtenidos por los métodos de difracción anteriores, se procedió a utilizar técnicas de microscopía para medir directamente la distancia entre las barbas y bárbulas de la pluma.

Como paso previo a la toma de datos, fue necesario lavar los fragmentos de plumas con gel hidroalcohólico al 70% con el fin de eliminar las partículas de polvo y grasa acumuladas en ellas. Asimismo, se diseccionó una de las plumas en barbas individuales para obtener una única hilera de bárbulas y facilitar así su observación y posterior análisis. A continuación, se colocó el fragmento de pluma sobre un portaobjetos y se observó la muestra con un aumento pequeño, que hizo posible obtener una vista general de la morfología de la pluma, y posteriormente con un aumento mayor, que permitió una gran caracterización de las barbas y las bárbulas.

Figura 4. Microfotografías del entramado de la pluma (izquierda) y de una barba individual (derecha).

Fuente. Elaboración propia



Las observaciones se realizaron con un microscopio óptico (Optika B-350 PL) con cámara digital (Opticam 2 Digital Camera) acoplado a un ordenador y el análisis de las microfotografías se llevó a cabo nuevamente con el programa *ImageJ*. Dado que la pluma no es una estructura perfectamente periódica, los parámetros de red pueden variar ligeramente según la zona en la cual se realiza la medida. Por ello, se hizo necesario medir reiteradamente la distancia entre barbas y bárbulas adyacentes, en diferentes zonas de la pluma, con diferentes escalas y con distintas plumas de gallina.

Resultados

Resultados de la primera experiencia

La utilización de diversos punteros láser, azul, verde y rojo, en la realización de la experiencia, evidenció la existencia de un patrón de difracción para el DVD, que se observó en todas las pruebas efectuadas.

Cuando la luz del puntero láser incide el DVD, se origina un patrón de difracción cuyos máximos se disponen perpendicularmente a la dirección de las rendijas, en nuestro caso, en dirección horizontal. Se observaron tres máximos en el patrón de difracción: uno central, correspondiente al haz no desviado del láser incidente y dos máximos de primer orden situados a ambos lados de este y con un cierto ángulo de desviación con respecto al punto central del patrón.

Figura 5. Separación entre los máximos del patrón de difracción del DVD en función de la distancia L entre el disco y la pantalla.

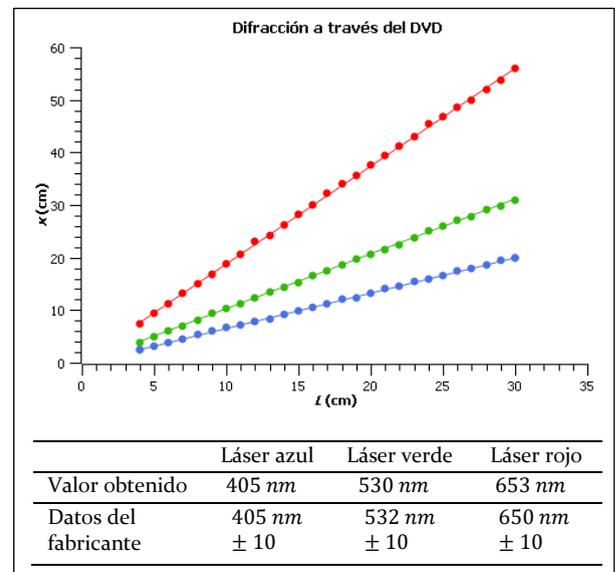


Tabla 1. Longitudes de onda obtenidas para los punteros láser utilizados.

Fuente. Elaboración propia.

Los ángulos de desviación de los primeros órdenes de difracción se obtienen a partir de la expresión $\tan \alpha = \frac{x}{L}$, donde x es la separación entre los máximos del patrón y L es la distancia entre el disco y la pantalla. La expresión anterior se puede calcular con la obtención de la pendiente a partir de un ajuste lineal realizado para cada conjunto de datos en la Figura 5.

Una vez obtenida la pendiente y por ende la tangente y el ángulo de desviación, fue posible determinar la longitud de onda de la radiación incidente haciendo uso de la ecuación $d = n\lambda$ dada en apartados anteriores.

Los tres conjuntos de medidas analizados, llevados a cabo con los láseres azul, verde y rojo, proporcionaron unos valores para la longitud de onda que estaban en excelente acuerdo con los ofrecidos por el fabricante.

Resultados de la segunda experiencia

La utilización de diversas plumas en la realización de la experiencia confirmó la existencia de un patrón de difracción común a todas ellas. Este patrón consta de dos subpatrones de difracción, uno producido por las bárbulas y otro, por las barbas.

Como se comentó en secciones anteriores, las bárbulas de la pluma, dispuestas de forma perpendicular entre sí, constituyen un entramado unido y periódico que convierte a la pluma en una excelente red de difracción.

En la figura 1, la disposición perpendicular de las bárbulas se puede visualizar esquemáticamente como una rejilla de difracción constituida por dos familias de rendijas perpendiculares, una horizontal y otra vertical, con dos periodicidades: a , que corresponde a la distancia entre rendijas adyacentes y b , que es el ancho de cada rendija. Dado que la pluma no es una rejilla rígida ni regular, sino más bien una estructura flexible y ligera, es previsible que exista una ligera deformación que convierta a la pluma en un entramado de aberturas rectangulares con valores ligeramente diferentes para los periodos horizontales, a , y los verticales, b . Sin embargo y con el objetivo de simplificar el análisis experimental, se considerará que la pluma es una rejilla de aberturas cuadradas con un parámetro de red constante.

Las dos familias de rendijas perpendiculares identificadas en la pluma dan lugar a dos patrones de difracción, perpendiculares entre sí y con punto de corte en el máximo central brillante. Las bárbulas orientadas en dirección vertical darán lugar al patrón horizontal, esto es, a los puntos brillantes situados a la derecha y a la izquierda del máximo central; y las bárbulas en dirección horizontal originarán el patrón vertical, constituido por los puntos brillantes dispuestos arriba y abajo del máximo central. De esta manera, al patrón de difracción generado por una sola rendija con una única periodicidad, como es el caso del DVD, se añade un nuevo patrón en la dirección perpendicular y además, una tercera secuencia de puntos brillantes, en direcciones oblicuas, que constituyen el patrón de difracción de las barbas y cuyo máximo central es cada punto brillante de los patrones de difracción, vertical y horizontal, originados por las bárbulas. / y una tercera secuencia de puntos brillantes, que emanan, en dirección

oblicua, de los máximos de los patrones de difracción de las bárbulas y que corresponden a los patrones generados por las barbas.

En la figura 4 se muestran los patrones de difracción originados por la pluma de gallina con los dos punteros láser. Las fotografías muestran los patrones de difracción más representativos de las distancias utilizadas en este proyecto.

Como se observa en la figura 4, en los patrones de difracción originados por las bárbulas de esta experiencia, se han podido observar máximos de primer orden en todas las mediciones efectuadas. Conforme la distancia entre la pluma y la pantalla disminuía fue posible observar además máximos de segundo y tercer orden (a y c). Sin embargo, cuando la distancia a la pantalla aumentaba, los máximos se distanciaban dando lugar a una progresiva desaparición de los máximos de segundo y tercer orden y a la formación de un patrón de difracción amplio con máximos de primer orden cada vez más alejados del máximo central (b y d).

En cuanto a los patrones de difracción producidos por las barbas, los máximos brillantes estaban más definidos que en el caso de las bárbulas, a pesar de lo cual se siguió observando una paulatina desaparición de los máximos de tercer y segundo orden conforme aumentaba la distancia a la pantalla.

Todo esto llevó a la conclusión de que la separación entre los máximos del patrón de difracción es directamente proporcional a la distancia entre la pluma y la pantalla. Con el objetivo de verificar la validez de esta conclusión, se procedió a demostrarla matemáticamente como sigue:

Sabemos que la posición de una franja oscura viene determinada por la fórmula $x = n \frac{L\lambda}{a}$ donde x es la separación entre los máximos, L es la distancia pluma-pantalla y a es la separación entre barbas o bárbulas. Suponiendo, como es el caso, que la longitud de onda del puntero láser, λ , y la separación entre barbas o bárbulas, a , permanecen constantes, entonces la ecuación anterior muestra que la posición de la banda sólo dependerá de la distancia entre la pluma y la pantalla, estableciéndose así una relación lineal entre ambos parámetros: $x \propto nL$.

Efectivamente, la relación obtenida tras la demostración matemática está de acuerdo con las observaciones efectuadas: al aumentar la distancia entre la pluma y la pantalla, también lo hará la que separa a los máximos del patrón de difracción, y viceversa. Esta relación se puede observar en los gráficos 1 y 2, donde se muestra la separación entre los máximos de primer orden del patrón de difracción de las barbas y bárbulas en función de la distancia L .

Por otra parte, se observaron diferencias entre los patrones de difracción producidos por el láser rojo y el verde. En el caso del láser verde, la menor separación entre los máximos hizo posible la observación de máximos de tercer orden tanto en el patrón de las barbas como en el de las bárbulas; sin embargo, con el láser rojo, la mayor separación entre los máximos tan solo permitió observar máximos de segundo orden en ambos patrones.

A partir de esto, se llegó a la conclusión de que la separación de los máximos en el patrón de difracción depende de la longitud de onda del láser incidente, de modo que al aumentar la longitud de onda de la radiación incidente, también aumenta la separación entre los máximos del patrón y es por esta razón que se observan más espaciados y en menor cantidad en el caso del láser rojo. Al igual que

en el caso anterior, partiendo de la fórmula de posición de una banda oscura y manteniendo esta vez constantes los parámetros L y a , se llegó a la siguiente relación: $x = n\lambda$.

A partir de esta expresión y dado que $\lambda_{rojo} > \lambda_{verde}$, se verificó que cuando se utiliza el láser rojo, el patrón de difracción se ensancha debido a una separación mayor entre sus máximos. En los gráficos 1 y 2 se observa la separación entre los máximos de difracción obtenida con ambos punteros láser.

De los ajustes lineales realizados en las gráficas anteriores y extrayendo la pendiente de cada recta, se determinó la separación entre las barbas y bárbulas con la ecuación $a \frac{x}{L} = n\lambda$. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 2. Separación entre barbas y bárbulas obtenida a partir del ajuste lineal de los datos obtenidos mediante el método de difracción.

	Láser verde	Láser rojo
Separación entre barbas (x_1)	255,552 nm	146,114nm
Separación entre bárbulas (x_2)	20,797 nm	19,492nm

Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, también cabe mencionar que, en el proceso de análisis de los patrones de difracción, se detectó, en reiteradas ocasiones, una anomalía consistente en la aparición de máximos de difracción en regiones del patrón que deberían ser oscuras (figura 16). Se trata de máximos de intensidad muy débil que parecen emanar de los máximos centrales y que se desvanecen rápidamente del patrón de difracción. Una posible explicación a este fenómeno podría ser que, dado que la pluma no es una estructura perfectamente periódica y uniforme, posee, en el área de incidencia del láser, dos o más parámetros de red, ligeramente diferentes entre sí, que dan lugar a dos o más patrones de difracción parcialmente superpuestos. En la figura 16, las flechas amarillas de la imagen de la izquierda señalan los máximos de un patrón de difracción y las flechas verdes de la imagen de la derecha señalan los máximos de otro patrón de difracción, superpuesto al anterior y de mayor intensidad.

Una forma de evitar la aparición de dos o más patrones de difracción superpuestos podría consistir, por ejemplo, en utilizar un puntero láser con una abertura menor, que incida sobre un área reducida de la pluma que contenga un único parámetro de red.

Resultados de la tercera experiencia

Por último, con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos para la separación entre barbas y bárbulas por el método de difracción, se presentan, en la siguiente tabla, los valores obtenidos del análisis de las microfotografías de la pluma.

Tabla 3. Separación entre barbas y bárbulas obtenida mediante el método de difracción (primera y segunda columna) y mediante microscopía óptica (tercera columna).

	Láser verde	Láser rojo	Microscopía
Separación entre barbas (x_1)	255,552 μm	146,114 μm	288,074 μm
Separación entre bárbulas (x_2)	20,797 μm	19,492 μm	20 μm

Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar, el conjunto de medidas realizadas con el láser verde está en excelente acuerdo con las obtenidas mediante la microscopía. En el caso del láser rojo, existe una gran incertidumbre en la medición de las barbas que podría llevar a pensar que los valores obtenidos por ambos métodos no casan entre sí. Esta fluctuación de valores es probablemente consecuencia de la estructura irregular de la pluma y del proceso de disección de la misma, en el que las barbas, al ser separadas de las barbas adyacentes, sufren ligeras modificaciones y se separan más que las bárbulas, cuya posición inicial permanece prácticamente invariable. A pesar de ello, el orden de magnitud de los resultados es compatible en todos los casos y tan solo difiere en unos pocos centenares de micrómetros en el caso de las barbas y unas decenas de micrómetros para las bárbulas.

Conclusiones

Se ha presentado una experiencia básica de difracción que pone de manifiesto el carácter ondulatorio de la luz y que, gracias a su sencilla implementación, resulta adecuada para realizar en cualquier laboratorio en el último curso de Bachillerato o en los primeros cursos de Universidad. Por medio del fenómeno de difracción ha sido posible calcular la longitud de onda de una radiación incidente, obteniendo un valor que concuerda con los datos proporcionados por el fabricante; y determinar la separación entre las barbas y bárbulas de una pluma, obteniendo unos resultados que están en excelente acuerdo con el trabajo tomado como referencia (Pérez García, 2012) y con las mediciones realizadas por microscopía. Así, se concluye que el método de difracción, si bien lento y laborioso para la obtención de resultados, es una técnica adecuada y fiable para caracterizar la estructura de una pluma y de forma general, para determinar los parámetros de red de una rejilla de difracción bidimensional.

Bibliografía

- Nitze, R. (2013, 27 agosto). The black drop effect is not an atmospheric phenomenon. Atmospheric Phenomena. <https://atoptics.wordpress.com/2013/08/27/the-black-drop-effect-is-not-an-atmospheric-phenomenon/>.
- Pérez García, H., García Molina, R., y Abril, I. (2012). Difracción de luz a través de una pluma de ave. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 9(1), 164-169.

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2021
Fecha de aceptación (provisional): 14 de diciembre de 2021
Fecha de aceptación (definitiva): 1 de julio de 2022