

## La importancia del trabajo experimental en física: un ejemplo para distintos niveles de enseñanza

C. Carreras, M. Yuste y J.P. Sánchez

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España.  
ccarreras@ccia.uned.es

Recibido el 1/09/2007. Aprobado en versión final el 15/09/2007.

**Sumario.** A través de un ejemplo, la difracción de la luz, se pretende demostrar que se puede y se debe familiarizar a los estudiantes con las teorías y los fenómenos físicos en cualquier nivel de enseñanza empleando métodos experimentales.

**Abstract.** This work aims to demonstrate, with the example diffraction of light, the relevance of familiarizing students of any grade with theories and physical phenomena using experimental methods.

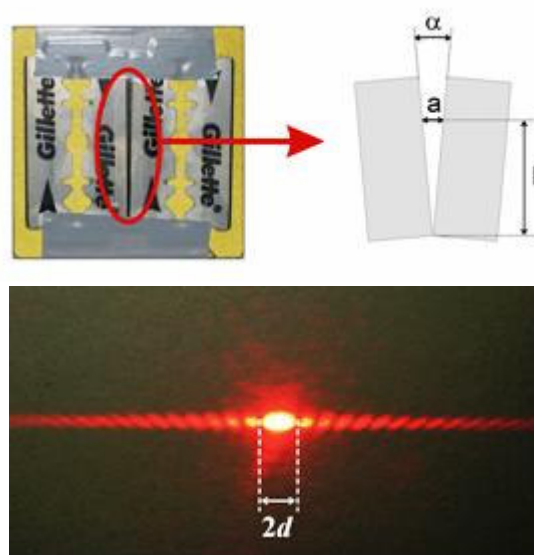
**Palabras clave.** Experiencias de cátedra y dispositivos experimentales 01.50.My, Uso de la computadora en el laboratorio 01.50.Lc, Óptica ondulatoria 42.25.-p, Difracción y scattering 42.25.Fx, Óptica de Fourier 42.30.Kq.

### 1 Introducción

Hemos elegido como modelo la difracción de la luz. Es un fenómeno óptico que se presenta en la naturaleza y que se puede producir en los laboratorios de manera sencilla. Su interpretación es compleja y requiere de herramientas matemáticas no asequibles en niveles medios de enseñanza. Por ello nos ha parecido que es buen ejemplo para poner en evidencia que, adaptándose al nivel de conocimientos matemáticos y físicos de los alumnos, se puede interpretar el fenómeno, realizar experimentos y comprobar teorías<sup>1</sup>. El grado de profundización dependerá del nivel, pero aún así los estudiantes deben abordar el estudio de este fenómeno que ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de la Física.

### 2 Presentación de la difracción en los niveles elementales (enseñanza secundaria y bachillerato)

Como es natural, en este nivel la presentación debe ser cualitativa.



**Figura 1.** Rendija de difracción de anchura variable, de fabricación casera (arriba) y su figura de difracción (abajo).

Se puede iniciar ésta describiendo los fenómenos naturales en los que la difracción se observa claramente: figuras luminosas producidas por el Sol al atravesar las hojas de los árboles, por los focos de luz lejanos observados a través de visillos (redes de difracción), rendijas estrechas,...., las coronas en torno al Sol, a la Luna, a las farolas del alumbrado público cuando hay muchas partículas en suspensión (gotitas de agua,...), los colores reflejados por un CD,...

Todos estos fenómenos se pueden ilustrar a través de fotografías o diapositivas.

Con ayuda del material indicado a continuación se puede observar la difracción y realizar algunos experimentos semicuantitativos.

**Material:** Un puntero láser ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ), una regla graduada en milímetros, una rendija de anchura  $a$  variable (construida con dos hojas de afeitar yuxtapuestas sobre un marco de diapositivas formando una "V" muy estrecha, como se indica en la Figura 1), un trozo de CD (que se utiliza como red de difracción por reflexión y por transmisión), y un frotis de sangre para observar la difracción producida por los glóbulos rojos.

**Experimentos que se pueden realizar con este material.**

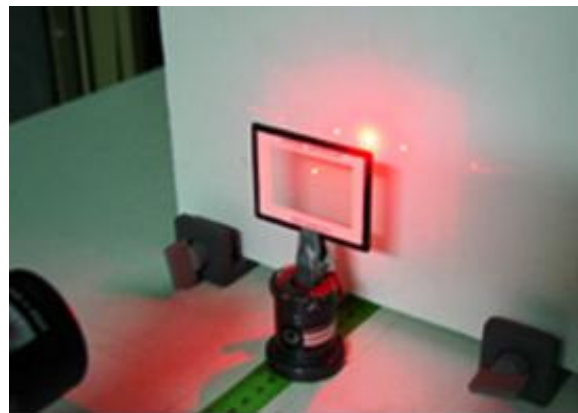
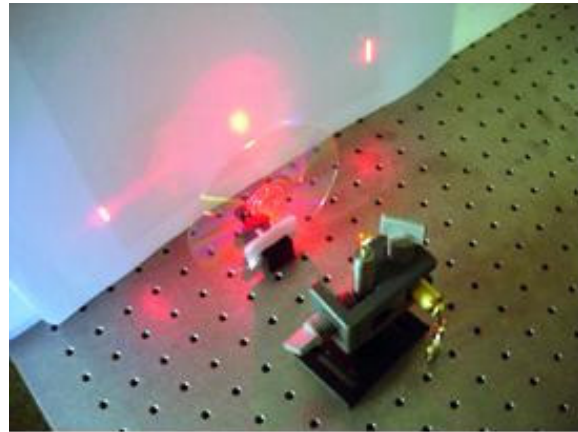
a) *Relación entre la anchura de la rendija y su espectro de difracción:* Si el puntero láser incide sobre la rendija de la Fig. 1, su patrón de difracción en una pantalla situada a un metro de distancia es la mostrada en la parte inferior de la misma figura. Dependiendo de la altura  $h$  a la que incida el láser, el espectro es más o menos extenso. Como la anchura  $a$  y la altura  $h$  están relacionadas ( $a = \alpha h$ ), se puede medir la variación de la semianchura  $d$  del máximo central de la figura de difracción en función de  $a$ . Haciendo una representación gráfica de  $1/d$  frente a  $a$ , se constata que se trata de una línea recta y, por lo tanto, que  $d$  y  $a$  son inversamente proporcionales.

b) *Determinación del tamaño de objetos pequeños:* El valor de la pendiente de la recta puede servir para determinar, *grosso modo*, las dimensiones de objetos muy pequeños (cabello, glóbulo rojo,...) observando sus correspondientes figuras de difracción a la misma distancia  $D$ , constatando que cuanto más pequeñas son sus dimensiones mucho más extendidas en la pantalla son las figuras de difracción.

c) *Determinación del espaciado entre las pistas de un DVD:* Al incidir el láser sobre la superficie de un DVD se observan, por reflexión o por transmisión, una serie de puntos luminosos que corresponden a los máximos principales de una red de difracción. La separación entre dos de estos puntos nos proporciona información sobre la distancia entre surcos del DVD o, lo que es lo mismo, sobre el número de líneas por milímetro que hay en la dirección radial. En las fotografías de la Figura 2 se pueden comparar los espectros producidos por un DVD y por una red de difracción.

En los tres casos (a, b y c), las expresiones matemáticas rigurosas son diferentes. Sin embargo, para esta

primera presentación no es necesario recurrir a ellas para que los alumnos aprecien la importancia de las técnicas difraccionales en la determinación del tamaño de objetos pequeños y estimen sus dimensiones.



**Figura 2.** Difracción producida por un DVD (arriba) y por una red de difracción de 600 líneas/mm (abajo).

### 3 Presentación de la difracción en el nivel intermedio (primeros cursos universitarios)

En este nivel los estudiantes conocen la formulación matemática elemental de la difracción. Esto permite realizar experimentos cuantitativos de mucha mayor precisión, sobre todo si se utilizan las técnicas computacionales que ahora están muy desarrolladas y extendidas. Como ejemplo presentamos el estudio experimental de la intensidad difractada por una rendija en aproximación de Fraunhofer y su ajuste teórico.

**Material:** Un láser de He-Ne, una rendija de anchura  $a$  variable, dos posicionadores micrométricos, un fotómetro calibrado y un multímetro.

**Descripción del experimento:** Tradicionalmente se utiliza la posición de los mínimos de difracción para determinar la anchura  $a$  de la rendija a través de la relación:  $a = m\lambda D/d$ , donde  $m$  es el orden del mínimo de difracción y  $\lambda$  la longitud de onda del láser. Midiendo los

diferentes valores de  $d$  a los que aparecen los mínimos, se determina el valor de  $a$ .

En el experimento que describimos aquí se mide la distribución de intensidad en todo el máximo central. Para ello se coloca el fotómetro a una distancia  $D$  fija de la rendija sobre un posicionador micrométrico, determinando el valor  $I_i$  de la intensidad en el plano de la pantalla en función de la distancia  $d_i$  a un origen arbitrario situado en dicho plano. En la Figura 3 se puede ver un esquema del dispositivo experimental y un ejemplo de medida.

Utilizando la simetría de la curva se determina la coordenada  $d_0$  del centro de la figura de difracción. Esto permite escribir el conjunto de valores experimentales de la intensidad en función de la variable  $d = d_i - d_0$ , que está relacionada con el ángulo de difracción a través de la siguiente expresión:  $\text{sen}\theta \approx d/D$ .

Los valores experimentales  $I_i$  de la intensidad se ajustan a la siguiente expresión teórica:

$$I = I_0 \left( \frac{\text{sen } \alpha}{\alpha} \right)^2 ; \quad \alpha = \frac{\pi}{\lambda} a \frac{d}{D}$$

con ayuda de un programa informático basado en el método de los mínimos cuadrados. El programa utiliza como parámetros de ajuste la anchura  $a$  de la rendija y la intensidad máxima  $I_0$ . Las ecuaciones que resultan son trascendentes, por lo que es necesario recurrir a un método iterativo de cálculo.

En la parte inferior de la Fig. 3 se muestra el ajuste teoría/experimento. Para mejorarlo se ensayan diferentes valores de  $d_0$  hasta que la suma  $S$  de las diferencias cuadráticas entre valores teóricos y experimentales alcanza su valor mínimo. En el ejemplo mostrado resulta ser de  $0,05425 \text{ mm} \pm 0,00002 \text{ mm}$ . Con este método se rebaja en dos órdenes de magnitud la precisión de la medida en relación con el método tradicional.

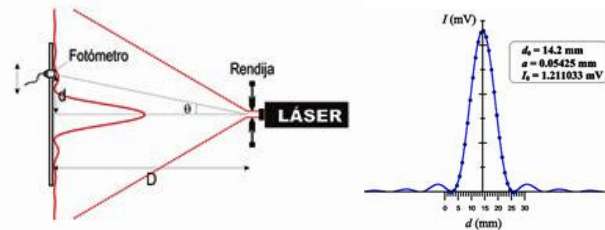
#### 4 Presentación de la difracción en el nivel superior (segundo ciclo)

En este nivel los estudiantes conocen perfectamente el principio general de Huygens-Fresnel, de donde se derivan las aproximaciones de Fresnel y Fraunhofer<sup>2,3,4</sup>. El objetivo que nos marcamos ahora es comprobar experimentalmente el grado de validez de ambas aproximaciones. Para ello se estudiará la difracción de objetos de dimensiones milimétricas, que puedan ser determinadas por métodos directos (nonius,...).

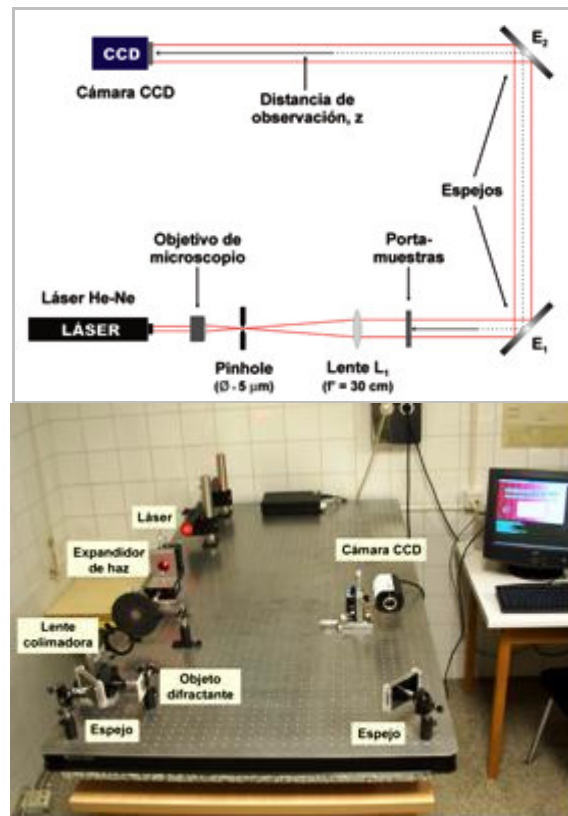
**Material:** Un láser de He-Ne, un expandidor de haz constituido por un objetivo de microscopio 60x, un agujero de  $5 \mu\text{m}$  de diámetro y una lente colimadora ( $f' = 30 \text{ cm}$ ), una cámara CCD, con su correspondiente software de análisis, espejos de primera superficie, dos lentes convergentes, una circular ( $f' = 50 \text{ cm}$ ) y otra cilíndrica ( $f' = 60 \text{ cm}$ ), posicionadores micrométricos, portaobjetos y un tablero óptico montado sobre una mesa antivibraciones.

**Descripción del experimento:** En la Figura 4 se

muestra tanto un esquema del montaje experimental como una fotografía del mismo. La primera tarea a realizar es expandir el haz láser, filtrarlo y colimarlo, con objeto de disponer de un frente de onda lo más plano posible en todos los experimentos.



**Figura 3.** Esquema del montaje experimental (izq.) y ajuste teoría/experimento (der.) en la difracción de una rendija.



**Figura 4.** Esquema (arriba) y fotografía (abajo) del montaje experimental para la comprobación de las aproximaciones de Fresnel y de Fraunhofer en el estudio de la difracción de la luz.

a) **Estudio de la difracción de Fresnel:** En primer lugar, se estudia la difracción de un borde rectilíneo (hoja de afeitar) producida por el haz expandido y colimado. Las imágenes se capturan con la luz incidiendo directamente sobre la superficie sensible de la cámara. Del estudio teórico y de su comparación con la figura capturada, los estudiantes determinan la dimensión de un píxel (cuadrado de  $4,65 \mu\text{m}$  de lado). Como la cámara proporciona las distancias en píxeles (y las intensidades en

niveles de gris), esta determinación les permite conocer las distancias reales en las figuras que genera el software al analizar las imágenes capturadas.

A continuación se procede al estudio de la difracción de Fresnel producida por una rendija de 1 ó 2 mm de anchura, que construyen ellos mismos con hojas de afeitar. Lo primero que hacen es reproducir teóricamente (con un programa de cálculo desarrollado en el laboratorio) la distribución de intensidad en un eje perpendicular a la rendija (eje X) para diferentes distancias  $z$  de observación, y la variación de la intensidad en el centro a lo largo del eje de propagación (eje Z). Esto les permite localizar las mejores zonas de estudio para verificar la aproximación de Fresnel.

En la Fig. 5 se muestran cuatro ejemplos de las imágenes capturadas por la cámara, los valores experimentales de la intensidad a lo largo del eje X y las correspondientes curvas teóricas (intensidad normalizada –se supone la onda incidente plana y de amplitud unidad–) para cuatro distancias  $z$  diferentes. Estas comparaciones permiten a los estudiantes determinar con precisión la anchura de la rendija, cuyo valor aproximado habían determinado con un nonius.

b) *Estudio de la difracción de Fraunhofer*: Con el programa de cálculo utilizado anteriormente, los estudiantes pueden pasar de la aproximación de Fresnel a la de Fraunhofer sin más que ir aumentando la distancia  $z$ . Para objetos milimétricos comprueban que es necesario alejarse más de 20 m para obtener la figura de difracción que proporciona la aproximación de Fraunhofer.

En el experimento sería necesario alejarse mucho con la cámara CCD para obtener imágenes directas de la difracción. Para soslayar este problema, los estudiantes utilizan las propiedades de las lentes delgadas como elementos transformadores de fase. El experimento consiste ahora en lo siguiente: se introduce una lente colector entre el objeto difractante y la cámara. Si la rendija se sitúa en el plano focal objeto de la lente, en su plano focal imagen obtenemos la transformada de Fourier exacta de la misma, es decir, su espectro de difracción en aproximación de Fraunhofer. Si la cámara no se sitúa en dicho plano, sino antes o después, lo que se obtiene es la difracción de Fresnel.

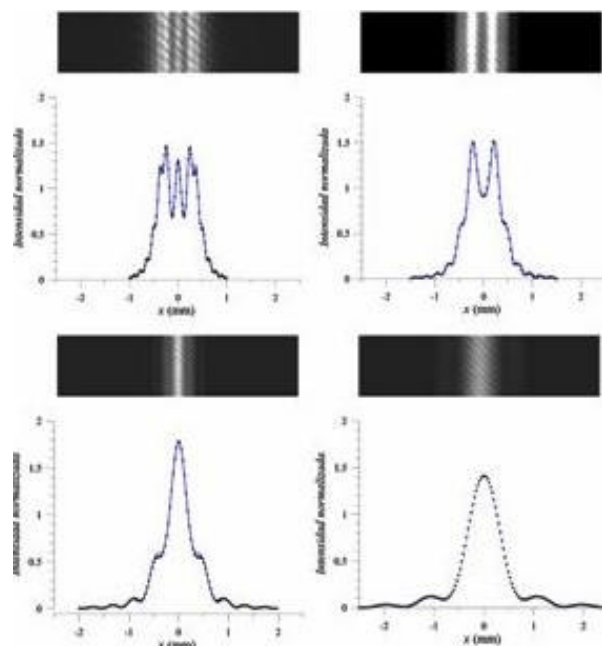
## 5 Conclusiones

Los experimentos, por sencillos que sean, permiten a los alumnos profundizar en el conocimiento de un fenómeno, estudiarlo teóricamente y experimentalmente a la vez, desarrollar habilidades y actitudes propias de los investi-

gadores, como son la búsqueda de soluciones a los problemas experimentales, la obtención de medidas con la menor incertidumbre posible, la interpretación y el análisis de los resultados, etc.

Si en la enseñanza primaria y secundaria se introduce la experimentación como metodología fundamental y cotidiana, quizá los experimentos sirvan también para atraer hacia la Física a un número mayor de estudiantes.

Por otra parte, independientemente de la opción que elija cada alumno para su futuro, no cabe la menor duda de que con esta forma de enseñar y de aprender estamos contribuyendo a aumentar el nivel científico de la mayoría de la población.



**Figura 5.** Figuras de difracción producidas por una rendija a diferentes distancias y sus correspondientes perfiles de intensidad teóricos y experimentales.

## Referencias

1. C. Carreras Béjar, *El trabajo experimental en la enseñanza de la Física*, Revista Española de Física. Vol. 20, Num. 2, 55-61 (2006).
2. E. Hecht, *Óptica*. Ed. Addison Wesley, Madrid (2000).
3. J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. Ed. McGraw-Hill, New York (1988).
4. M. Born & E. Wolf, *Principles of Optics*. Pergamon Press, Oxford (1991).