

nores que la de los fotones usados en microscopía óptica. Entonces se puede hacer pasar a los electrones por aperturas de diámetro mucho menor que los fotones. Por lo tanto, si la apertura es de diámetro menor, para conseguir el mismo diámetro de haz explorador  $d$ , será necesario un ángulo  $\alpha$  menor (ver figura 5) y por lo tanto la altura  $h$ , es decir la profundidad de campo, será mayor. Esto se traduce en que el microscopio electrónico puede alcanzar una muy superior profundidad de campo con respecto al óptico.

### APLICACIONES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Son numerosas las aplicaciones del MEB y en muy diferentes campos. Dentro de dichas aplicaciones cabe destacar las siguientes:

- En metalurgia se emplea para la caracterización de materiales metálicos, estudio de sus transformaciones, análisis de fallos, fractografía, etc.
- En petrología y mineralogía, para caracterización de minerales, estudio de fenómenos de zonación, intercrecimiento, desmezcla, etc.
- En la construcción se utiliza para el estudio del cemento y de las reacciones árido-hormigón.
- En cristalografía, para la caracterización de vidrios y materiales cerámicos mediante el estudio de las fases, la estructura cristalina, poros, bordes de grano, etc.

- En electrónica, para el estudio tanto de materiales semiconductores como de dispositivos (control de calidad de circuitos integrados).
- En biología, para la identificación de estructuras biológicas, complejos moleculares e incluso moléculas.
- En botánica, como ayuda para la clasificación de los diferentes grupos vegetales en sus distintas categorías taxonómicas mediante el estudio morfológico de esporas, pared celular, estomas, etc.

### BIBLIOGRAFÍA

1. Goodhew, P.J., Humphreys, J. and Beanland, R. "Electron microscopy and analysis" (third edition). Ed. Taylor & Francis, London, 2001.
2. Watt, I.M. "The principles and practice of electron microscopy" (second edition). Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
3. Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L. and Michael, J. "Scanning electron microscopy and X-Ray microanalysis" (third edition). Ed. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2003.
4. Aballe, M., López, J., Badía, J.M. y Adeva, P. "Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X". Ed. Rueda, Madrid, 1996.

Santiago Martín Fernández

Dpto. de Física Matemática y de Fluidos

## TALLER Y LABORATORIO

### Experimento casero:

### Difracción de la luz: comparación experimental de la capacidad de almacenamiento de un CD y de un DVD

#### INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la difracción consiste, básicamente, en una desviación de las ondas al rodear los bordes de un obstáculo que se interpone en su propagación. Posteriormente, las ondas difractadas interfieren unas con otras, pudiéndose originar regiones de reforzamiento (interferencia constructiva) o debilitamiento (interferencia destructiva) mutuos. Se trata de un fenómeno ondulatorio, que también puede observarse con haces de par-



Photograph of the beach at Tel Aviv, Israel, dramatically shows single-slit diffraction of ocean waves through the barrier openings. Note that the beach has been shaped by the circular wave fronts.

Photo taken by Sabina Zigman, a sophomore in physics honors class at Benjamin N. Cardozo High School, Bayside, New York. Photo submitted by her teacher, Sheldon Wirtzman.

Figura 1. Difracción de las olas del mar en una barrera artificial situada frente a una playa.

tículas atómicas tales como electrones, neutrones, etc. (lo que se considera una prueba del comportamiento ondulatorio de estas partículas bajo determinadas condiciones). Conviene destacar que el fenómeno de la difracción se produce siempre que un frente de onda es interrumpido por un obstáculo, cualquiera que sea la onda que intervenga. Aunque quizá la más mencionada sea la difracción de la luz (visible), el fenómeno se produce con cualquier tipo de radiación electromagnética (ultravioleta, infrarrojo, visible, microondas, rayos X, ...).

En el caso de la luz visible, podemos observar la difracción a simple vista proyectando sobre una pantalla la sombra de un objeto o la luz que sale de una pequeña rendija (la difracción produce una especie de doble sombra en los bordes de ambos obstáculos). También observamos la difracción de la luz cuando miramos hacia una fuente luminosa a través del tupido tramado de un tejido de nylon, cuando miramos al Sol a través del espeso ramaje de un árbol (Fig. 2) o en efectos ópticos naturales como la corona que vemos formarse alrededor del Sol o de la Luna cuando una fina capa de nubes, niebla, bruma o incluso pequeños cristales de hielo o partículas de polen en suspensión se interpone por delante (los obstáculos que difractan la luz procedente de estos astros son las pequeñas gotas de agua o las partículas en suspensión en la atmósfera terrestre). Por supuesto, la difracción también ocurre cuando un haz de luz incide en una lente, lo que puede llegar a ser un molesto efecto que dificulte el empleo óptico para el que ha sido diseñada; por ejemplo, una estrella vista a través de un telescopio es un pequeño disco luminoso rodeado (si la lente es buena y el aire está tranquilo) por uno o dos delgados anillos, que son producidos por difracción en el objetivo del telescopio y amplificados por el sistema óptico que acompaña.

El fenómeno de la difracción es más acentuado en obstáculos de dimensiones próximas a la longitud de



Figura 2. Difracción de la luz del Sol en la neblina matinal del bosque.

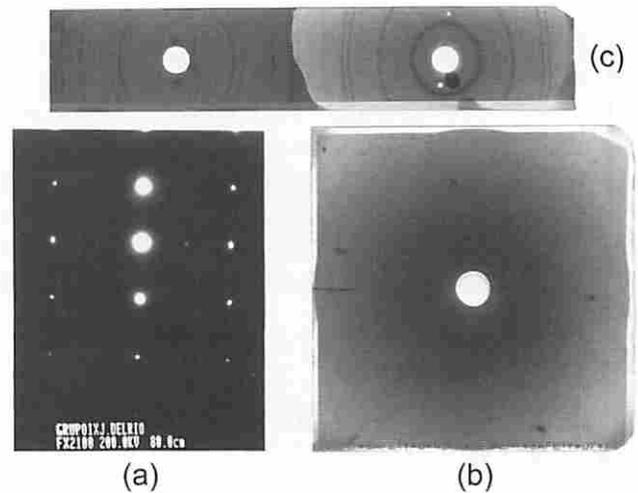


Figura 3. Diagramas de difracción de electrones (a) y de rayos X (b y c) en cristales.

onda de la radiación difractada. En ese dominio, los fenómenos ondulatorios dominan frente a las clásicas trayectorias de la luz a lo largo de estrechas líneas o rayos. Así, la difracción de la luz visible (400-700 nm) se observa fácilmente con objetos difractantes (obstáculos opacos u orificios practicados en pantallas opacas) de unas pocas micras; por ejemplo, un cabello, un glóbulo rojo, etc. Los rayos X, con longitudes de onda entre 0,03 nm y 3 nm aproximadamente, sufren una fuerte difracción al atravesar los sólidos cristalinos, pues las distancias interatómicas en las redes cristalinas son de ese orden (de unos pocos ångströms). Un haz de electrones, cuya longitud de onda asociada (longitud de onda de De Broglie) puede ser inferior a la décima de ångstrom (su valor depende del potencial al que han sido acelerados; en tratamiento no relativista, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del voltaje acelerador), puede resultar muy apropiado para estudiar estructuras macromoleculares (ADN, etc.) de unos pocos nanómetros.

Veamos a continuación una de las principales aplicaciones que tiene este importante fenómeno óptico.

### DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE UN OBJETO PEQUEÑO POR MEDIO DE LA DIFRACCIÓN

Si nos construimos una pequeña rendija aproximando dos cuchillas colocadas en un mismo plano y hacemos incidir sobre ellas un haz de luz procedente, por ejemplo, de un pequeño puntero láser, se puede observar proyectada en una pantalla a una cierta distancia una figura de difracción característica, que podemos ver en la fotografía adjunta (Fig. 4). Cualitativamente, la figura consiste en una "banda" luminosa larga y estrecha, contenida en el plano perpendicular a la dirección longitudinal de la rendija y que presenta una serie de franjas oscuras dispuestas periódica y simétricamente respecto al centro de la figura.

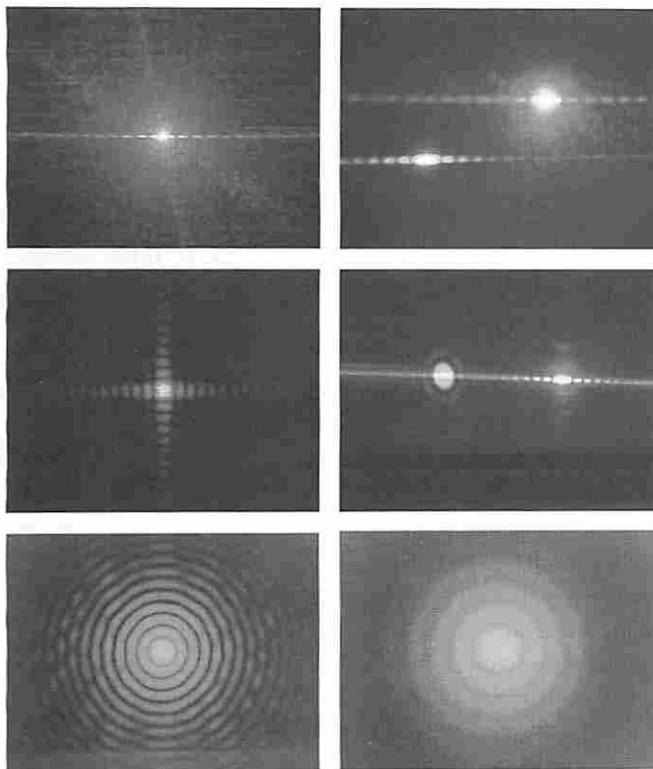


Figura 4. Figuras de difracción producidas por objetos tales como una rendija, un cabello, un agujero cuadrado, otro circular y un glóbulo rojo.

Si cambiamos la separación entre las cuchillas, variando así la anchura de la rendija formada entre ambas, se observa que a medida que estrechamos el orificio la figura de difracción aumenta sus proporciones, manteniendo su aspecto cualitativo. Es decir, se observa que el efecto de la difracción de la luz, entendida como una desviación sufrida por el haz respecto a su dirección de incidencia en la rendija, es tanto más acentuado cuanto menor es el tamaño de ésta y más se aproxima a la longitud de onda del láser (en este caso, unos 650 nm).

Formalmente, la distribución de intensidad de luz en una pantalla suficientemente alejada del plano de la rendija tiene la forma (aproximación de Fraunhofer):

$$I = I_0 \left( \frac{\text{sen } \beta}{\beta} \right)^2 ; \beta \equiv \frac{\pi ad}{\lambda D}$$

donde:

- $a$  = anchura de la rendija
- $d$  = distancia al centro de la figura (en el plano de observación)
- $D$  = distancia rendija-pantalla
- $\lambda$  = longitud de onda de la radiación

De esta expresión se infiere que la anchura del máximo central (mancha luminosa comprendida entre los dos mínimos, franjas oscuras, más próximos al centro) resulta ser inversamente proporcional a la anchura de la rendija:

$$\text{Anchura del máximo central} = 2d_1 = \frac{2\lambda D}{a}$$

Aunque objetos difractantes con otras geometrías producen figuras de lo más variado, para las que puede resultar enormemente complicada la deducción de una expresión teórica asociada a su intensidad, lo que tienen en común todos los casos es la relación inversa entre las dimensiones del objeto difractante y las de su figura de difracción: cuanto menor es el tamaño del objeto, mayor es su poder difractor. En consecuencia, siempre que se sepa correlacionar ambas magnitudes, el tamaño del objeto y el de su figura de difracción, podrá emplearse este fenómeno para la determinación del primero a partir del segundo, algo que puede resultar muy útil cuando no es posible hacerlo por otros medios.

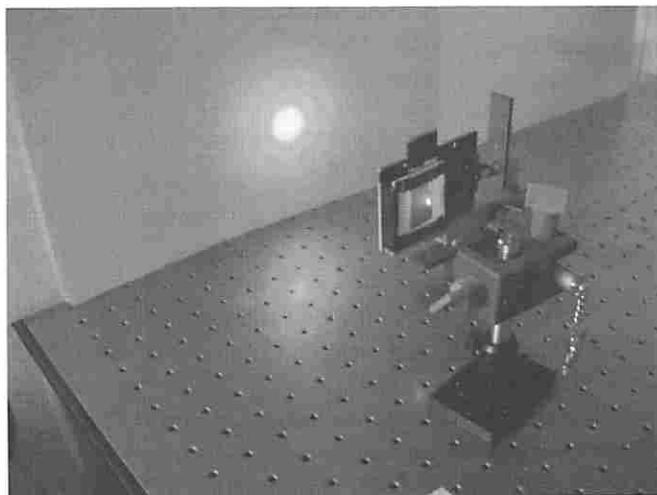


Figura 5. Figura de difracción producida por una muestra de sangre; su observación permite determinar el tamaño de los glóbulos rojos.

### REDES DE DIFRACCIÓN

Cuando dos o más objetos difractantes se hallan muy próximos, las ondas difractadas por ambos pueden interferir entre sí, dando lugar a una figura de difracción global cuyo aspecto dependerá de la geometría de los objetos, de su número y de su distancia de separación. Es lo que en Óptica se conoce como una *red de difracción*.

Las redes más comunes son las que están constituidas por un número elevado de elementos idénticos y equidistantes entre sí, normalmente microcanales practicados en una placa de vidrio a modo de rendijas paralelas, que dan lugar a una figura de difracción bien conocida.

La distribución de intensidad luz en la figura de difracción de una red constituida por  $N$  aberturas paralelas de anchura  $a$ , cuyos centros están separados entre sí una distancia  $b$ , tiene la forma (aproximación de Fraunhofer):

$$I = \left( \frac{\sin N\delta}{\sin \delta} \right)^2 \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2; \delta \equiv \frac{\pi b d}{\lambda D}, \beta \equiv \frac{\pi a d}{\lambda D}$$

El segundo factor corresponde a la difracción de una rendija de anchura  $a$  (*factor difraccional*), mientras que el primer factor tiene en cuenta el efecto debido a la existencia de las  $N$  rendijas idénticas separadas una distancia  $b$  (*factor interferencial*).

Aunque esta distribución de luz presenta una serie de máximos principales, otros máximos secundarios y mínimos nulos, en la práctica sólo suelen ser visibles los máximos más brillantes, los principales, que se distribuyen simétricamente respecto al máximo situado en el centro de la figura, el más intenso (ver Fig. 6). La separación angular,  $\theta_m$ , entre el máximo central (o máximo de orden  $m = 0$ ) y el máximo principal de orden  $m$  se relaciona con la distancia de separación entre rendijas,  $b$ , mediante la expresión:

$$\sin \theta_m = \frac{d_m}{\sqrt{d_m^2 + D^2}} = m \frac{\lambda}{b} \quad (1)$$

donde:

- $\theta_m$  = ángulo de difracción de orden  $m$
- $d_m$  = distancia del máximo de orden  $m$  al centro de la figura (en la pantalla)
- $D$  = distancia pantalla-red de difracción
- $m$  = orden de difracción ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )
- $\lambda$  = longitud de onda de la radiación
- $b$  = parámetro de red

La relación anterior permite determinar la separación entre las rendijas de la red, magnitud conocida como *parámetro de red*, midiendo la separación entre los máximos observados.

De esta misma expresión se deduce una propiedad de las redes de difracción, de gran utilidad, que es su ca-

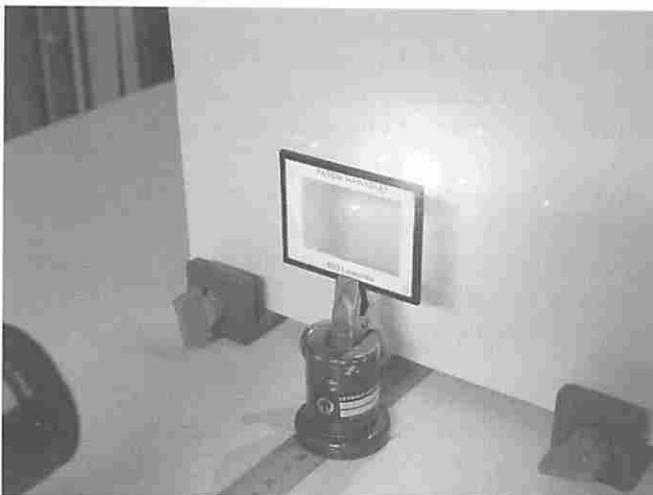


Figura 6. Figura producida por una red de difracción.

pacidad para discriminar longitudes de onda diferentes. Distintos valores de  $\lambda$  sufren diferente difracción, por lo que un haz incidente compuesto de varias longitudes de onda es descompuesto espectralmente al emerger de la red.

### EJEMPLO PRÁCTICO: COMPARACIÓN DE UN CD Y UN DVD POR MEDIO DE LA DIFRACCIÓN

Tanto un CD (*Compact Disc*) como un DVD (*Digital Versatile Disc*) consisten en un disco hecho de un plástico policarbonado transparente en el que se han marcado agujeros (indentaciones, por prensado) siguiendo una especie de circuito en espiral, y sobre el cual se ha depositado una capa reflectante de níquel o de aluminio y lacas y plásticos protectores para evitar que los agujeros se deterioren con el uso del mismo. La secuencia de agujeros constituye la información contenida en el disco, codificada y digitalizada, y es leída por un diodo láser por la cara inferior (policarbonato).

Sin entrar en detalles acerca de los diferentes tipos de codificación y organización de la información almacenada, la hilera de agujeros completa o cualquier porción de ella debe ser leída desde el interior del disco hacia el borde externo y a velocidad lineal constante (*Constant Linear Velocity, CLV*). Por este motivo, la velocidad de rotación del disco debe ser mayor al leer la parte central e ir disminuyendo a medida que el punto de lectura se aproxima al borde exterior (no obstante, muchos de los lectores actuales de DVD operan a velocidad angular constante, por lo que la máxima velocidad de transferencia de datos especificada sólo se alcanza en el

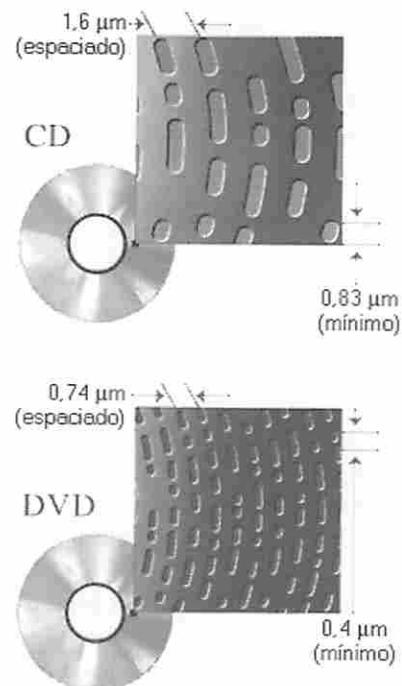


Figura 7. Comparación entre un CD y un DVD.

borde exterior del disco). Cuando el haz láser, focalizado sobre la capa metálica, incide en un agujero, sufre una reflexión distinta a la que se produce cuando no lo hay, de manera que la presencia o no de un agujero se traduce como un -1- o un -0- en términos de información binaria (dicho de manera más rigurosa, los agujeros en el metal son vistos desde la cara de lectura como prominencias, que tienen una altura muy precisa, de manera que la onda reflejada por el metal recorre un camino óptico diferente cuando hay o no montículo; la diferente fase en ambos casos hace que la onda total, suma de incidente más reflejada, presente en términos interferenciales dos estados bien diferenciados. Además, las prominencias y zonas planas no representan directamente los ceros y unos binarios, sino que el cambio “escalón-valle” o “valle-escalón” representa el uno, mientras que el “no cambio” representa el cero; obviamente, los agujeros pueden ser de distinta longitud en la dirección de la espiral).

Físicamente, la diferencia entre un CD y un DVD de una capa (o DVD-5) está en el tamaño de las indentaciones (anchura, longitud mínima y profundidad) y en la distancia de separación entre las diferentes vueltas de la espiral descrita, siendo de menor magnitud todos estos parámetros en el DVD. La reducción del tamaño de los agujeros (bits) y más denso empaquetamiento hace necesario el empleo de un láser de menor longitud de onda para su lectura, por lo que en el caso del CD se utiliza un láser infrarrojo (780-790 nm), mientras que para el DVD se utiliza un láser rojo (635-650 nm); en la actualidad, nuevos formatos de discos de mayor empaquetamiento y por tanto mayor capacidad utilizan para su lectura un láser azul (405 nm). (El índice de refracción del policarbonato es de 1,55, por lo que las longitudes de onda en su interior se ven reducidas en este factor.)

Por el tamaño y la separación de sus “micro-surcos”, estos discos se comportan para la radiación visible como una red de difracción por reflexión. De ahí que cuando son iluminados con luz blanca, se ve por su cara inferior la característica descomposición espectral (separación cromática) de la luz visible (por cierto, de dicha observación se puede distinguir un CD de un DVD fácilmente: a menor parámetro de red mayor po-

der difractor, por lo que las “bandas” de colores de los diferentes órdenes de difracción se muestran mucho más separadas en el caso del DVD). Basándonos en este fenómeno, vamos a mostrar un sencillo experimento casero para comparar la capacidad de almacenamiento de ambos tipos de soporte.

Para llevar a cabo el experimento, utilizamos un pequeño puntero láser ( $\lambda = 635 - 670 \text{ nm}$ ), una pantalla blanca y un disco de cada tipo, un CD y un DVD. Por comodidad, conviene usar los discos como redes de difracción por transmisión, no por reflexión, por lo que deben ser transparentes (estos discos, sin la capa metálica reflectante, suelen encontrarse como simples plásticos protectores en el fondo de las tarrinas de discos grabables de algunas marcas conocidas del mercado; de no disponer de ellos, siempre puede trocearse un disco cualquiera y eliminar la capa metalizada de uno de los trozos directamente con la uña).

Si hacemos incidir el haz láser sobre una de las caras, podemos observar sobre la pantalla, a una cierta distancia de la cara opuesta, la figura de difracción correspondiente a ambas redes (ver Fig. 9).

La sección del haz incidente es un círculo de uno o dos milímetros de diámetro, por lo que, microscópicamente, la superficie del disco iluminada abarcará una región por la que pasarán muchísimas líneas de la espiral de bits (del orden de mil). En cada una de estas hileras, ni la longitud de las indentaciones ni la separación entre dos agujeros consecutivos es constante; su carácter aleatorio hace que, además, todas las hileras sean diferentes, lo único que tienen en común es su anchura y la separación entre ellas. Por este motivo, la difracción de la luz en la dirección paralela al recorrido de la espiral, dirección longitudinal de los surcos, apenas se aprecia (se cancela por superposición de diferentes patrones aleatorios). A todos los efectos, es como si los surcos fueran continuos.

En la dirección perpendicular, podemos observar la serie de máximos principales en ambos casos, órdenes

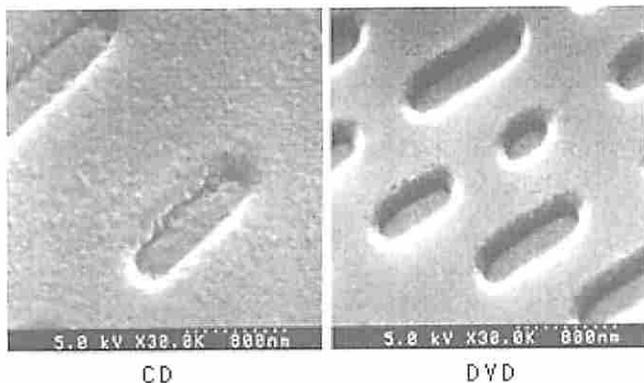


Figura 8. Imágenes de las indentaciones (pistas) de un CD y un DVD obtenidas por microscopía electrónica de barrido.

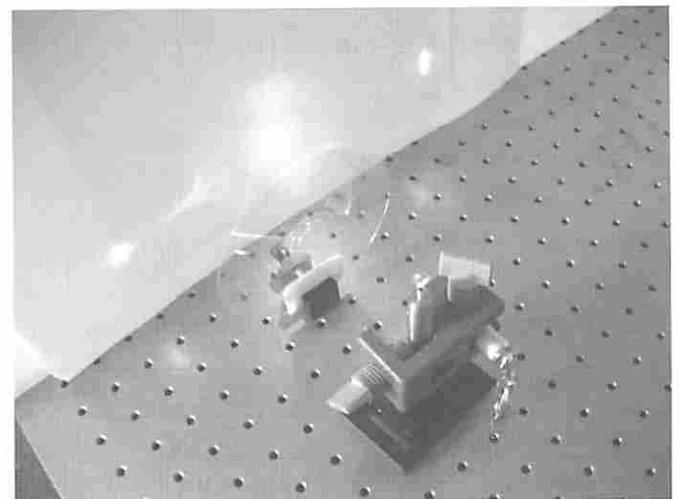


Figura 9. Montaje experimental utilizado para la comparación entre un CD y un DVD.

$m = 0$  y  $m = 1$  para el DVD y un orden más para el CD, que nos dan información acerca de la separación entre líneas de la espiral (ya se intuye que puede ser el doble en el caso del CD respecto al DVD). La información sobre la anchura del surco (factor difraccional de la expresión de la intensidad) no puede extraerse de las figuras observadas, sería necesario llevar a cabo medidas de intensidad de luz de varios órdenes de difracción, con las dificultades que ello entraña, o visualizar muchos órdenes de difracción para encontrar dónde llegan a anularse; en este sentido, el ver tan pocos órdenes puede interpretarse como indicativo de que la separación entre surcos es mayor que la anchura de los mismos, pero en un factor no muy grande.

Llevando a cabo las mediciones oportunas y haciendo uso de la expresión (1) dada en el apartado anterior, se obtiene como resultado:

	CD	DVD
$D$ (mm)	71,7	66,0
$2d_1$ (mm)	249,0	244,5
$2d_2$ (mm)	69,5	—
Espaciado entre surcos, $b_{exp}$ (μm)	$1,51 \pm 0,04$	$0,74 \pm 0,02$
Dato bibliográfico, $b_{teor}$ (μm)	1,6	0,74

Conocido el parámetro de red,  $b$ , de cada disco, se puede estimar la longitud total de la espiral de bits y el número de vueltas (espiras) de que consta. Los discos tienen 12 cm de diámetro, con un agujero central de 15 mm de diámetro; la información digital comienza a 25 mm del centro y se extiende hasta los 58 mm. Dividiendo la superficie grabada en elementos infinitesimales con forma de corona de radio interno  $r$  y anchura  $dr$ , cada uno de estos elementos contendrá  $dr/b$  espiras de longitud  $2\pi r$ , por lo que la longitud total de la espiral se puede aproximar mediante la integral:

$$L \cong \int_{r_1=25\text{ mm}}^{r_2=58\text{ mm}} \frac{2\pi r}{b} dr = \frac{\pi}{b} (r_2^2 - r_1^2)$$

y el número total de espiras:

$$N \cong \frac{r_2 - r_1}{b}$$

Los resultados así obtenidos son los siguientes:

	CD	DVD
Longitud espiral de bits (km)	5,7	11,6
N.º de espiras	$21,8 \times 10^3$	$44,6 \times 10^3$

Si hacemos uso de algún dato teórico adicional, podemos extraer más información de nuestros resultados. Por ejemplo, un CD de 74 minutos de duración emplea ese tiempo en ser leído completamente a una velocidad básica de  $1\times$  (150 kB/s), ya que su capacidad es de 681.984.000 Bytes (aproximadamente 650 MB). Sabiendo esto, del resultado de la longitud total de la espiral se puede deducir la velocidad lineal de lectura (CLV) y la velocidad de rotación del disco; a saber:

CD-74 min (650 MB)	Experimento	Teoría
Velocidad lineal, CLV (m/s)	1,28	1,2 – 1,4
Velocidad de rotación (rpm)	211 - 490	200 - 500

Si lo queremos comparar con un DVD de una sola capa, cuya capacidad es de 4,7 GB ( $4,7 \times 10^9$  Bytes), debemos tener en cuenta que en este formato, DVD, la velocidad básica de  $1\times$  es nueve veces superior a la del CD (es decir, es de 1.350 kB/s), por lo que su lectura completa a dicha velocidad emplearía 3.400 segundos. Con esta información y el resultado de la longitud total de la espiral se obtiene para el DVD:

DVD-5 (4,7 GB)	Experimento	Teoría
Velocidad lineal, CLV (m/s)	3,42	3,49
Velocidad de rotación (rpm)	563 - 1.306	570 - 1.600

En definitiva, con este sencillo experimento casero puede obtenerse información suficiente para hacerse una idea de los órdenes de magnitud de los parámetros físicos involucrados en esta tecnología, así como de la diferencia esencial entre un CD y un DVD.

**REFERENCIAS**

[1] Carreras, C.: *El trabajo experimental en la enseñanza de la Física*. Revista Española de Física, Vol. 20, n.º 2, 55-61 (2006). ISSN: 0213-862X.  
 [2] Carreras, C.; Yuste, M. y Sánchez, J.P.: *La importancia del trabajo experimental en Física: un ejemplo para distintos niveles de enseñanza*. IV Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria, La Habana (Cuba), 2007.  
 [3] [http://stream.uen.org/medsol/dvd/pages/dvd\\_format\\_DVDvsCD.html](http://stream.uen.org/medsol/dvd/pages/dvd_format_DVDvsCD.html)  
 [4] Bloomfield, L.A.: *How Things Work. The Physics of Everyday Life*. (2<sup>nd</sup> ed.) Editorial: John Wiley & Sons. (2001). ISBN: 0471381519.

Juan Pedro Sánchez Fernández  
 Dpto. de Física de los Materiales