



Física Experimental 2



Práctica 2: Óptica

(interferencia y difracción de la luz)

1. Objetivos

- Estudiar fenómenos relacionados a las propiedades ondulatorias de la luz.
- Observar los patrones de difracción generados por una red de difracción y por un objeto difractor.
- Como aplicaciones se buscará determinar la longitud de onda de un láser y medir el espesor de un cabello.

2. Principales competencias a desarrollar

- Implementar en grupos una experiencia sencilla para estudiar el fenómeno de difracción, tomando decisiones sencillas sobre la forma de armar el montaje experimental y las medidas a realizar para llegar a desarrollar la práctica. También se pretende que logren analizar si hay diferentes formas de tomar las medidas de acuerdo al método que luego quieran utilizar, y tomar decisiones en ese sentido en conjunto con él o la docente.
- Analizar los resultados y elaborar conclusiones vinculando los resultados con el

3. Fundamento teórico: difracción

La difracción es el fenómeno que se produce cuando la luz, al pasar por aperturas pequeñas, o por obstáculos pequeños (comparables a su longitud de onda), se desvía de su propagación rectilínea.

Consideramos una apertura circular iluminada por un haz de luz colimado (se denomina luz colimada a la luz cuyos rayos son paralelos entre sí) y monocromática (la luz monocromática es aquella formada por componentes de un sólo color, o sea tiene una única longitud de onda). En la aproximación de la óptica geométrica la proyección del haz transmitido por la apertura sobre una pared sería un círculo idéntico a la apertura. Fuera de la región de la imagen habría oscuridad completa (zona de la sombra geométrica). La óptica geométrica es la parte de la física que estudia los cambios de dirección que experimentan los rayos de luz en la reflexión y la refracción, asume que los rayos se propagan en línea recta y que las dimensiones de los objetos sobre los cuales incide la luz

sean mucho mayores que la longitud de onda de la luz.

El primer trabajo sobre la desviación de la luz de su trayectoria rectilínea se debe a Francesco Maria Grimaldi en el siglo XVII, que observó que cuando la apertura es muy pequeña y la distancia de observación es suficientemente grande, la luz penetra en la zona de la sombra geométrica.

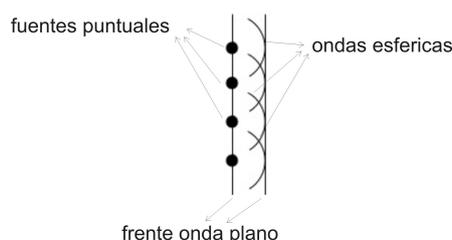


Figura 1: Frente de onda plano generado por ondas esféricas

La difracción puede ser entendida a nivel fenomenológico usando el principio de Huygens-Fresnel, que establece que cada punto de un frente de onda, en un instante de tiempo dado, se comporta como una fuente de ondas (secundarias) esféricas, como se muestra en la figura 1. La intensidad de la luz en cualquier punto adelante de la fuente es debida a la interferencia de todas estas ondas. Aunque cada punto individual genera una onda esférica, la interferencia de todas ellas genera una onda plana que viaja en la misma dirección que la onda inicial, como se muestra en la figura 1.

Cuando el frente de onda encuentra un obstáculo, algunos puntos fuente de ondas secundarias desaparecen y el resultado es un patrón de interferencia diferente a una onda plana, que se denomina patrón de difracción. En particular, los puntos que se encuentran en los extremos del frente de onda obstruido no tienen al lado otros puntos que generen ondas que interfieran con las ondas que ellos generan. Las ondas entonces generadas por estos puntos se aproximan a ondas esféricas o cilíndricas. Como consecuencia, al adoptar el frente de onda una forma redondeada en donde fue recortado, la dirección de propagación de la onda cambia, girando hacia el obstáculo.

La figura 2 muestra como se modifica el frente de una onda plana al pasar por una apertura pequeña.

La difracción, como la interferencia, son característicos de los fenómenos ondulatorios, siendo la luz un caso particular de estos fenómenos.

3.1. Difracción de Fraunhofer

Los fenómenos de difracción se clasifican en dos categorías, que dependen de la distancia entre el objeto difractante y el punto de observación. Cuando la distancia no es grande (veremos abajo el criterio), la imagen en el punto de observación preserva similitud con la forma geométrica del objeto difractante (es decir, el obstáculo). Cuando la distancia es grande, la distribución de la densidad de energía resultante de la interferencia entre las ondas que se propagan después de la apertura es un patrón de franjas claras y oscuras. El patrón de difracción permite determinar las dimensiones del objeto que difracta. Este último es el modelo de Fraunhofer, y es válido cuando la distancia entre el objeto difractante

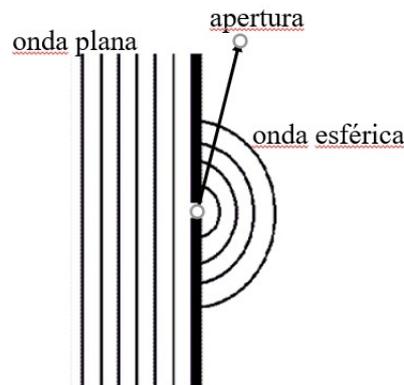


Figura 2: Modificación frente de onda plana por apertura pequeña

(apertura u obstáculo) y el punto de observación es mucho mayor que el tamaño de la apertura.

El modelo de Fraunhofer es muy utilizado porque además de proporcionar resultados correctos para la mayoría de las experiencias sencillas que se pueden realizar en el laboratorio, es de los que implican cálculos más sencillos.

El otro modelo de difracción es el de Fresnel, o de campo próximo, válido cuando el punto de observación se encuentra cerca del objeto que difracta.

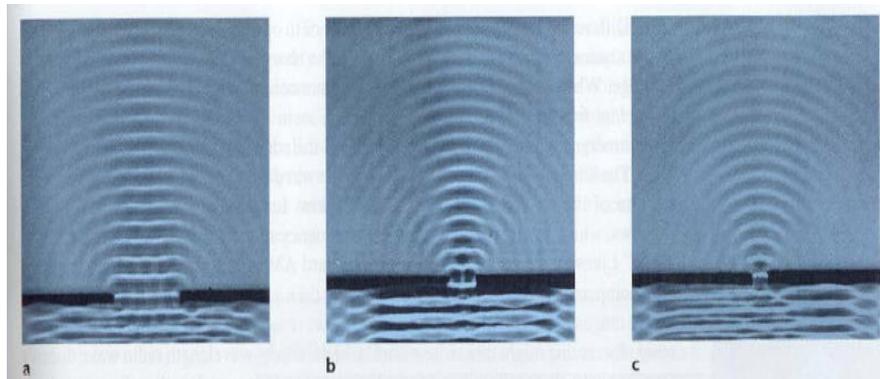


Figura 3: Modificación del frente de onda por aperturas de diferentes tamaños

La figura 3 muestra como se modifica el frente de una onda en un tanque de agua al pasar por aperturas de diferentes tamaños.

3.1.1. Difracción por una rendija simple

Para estudiar la difracción generada por una apertura consideremos que la luz llega como una onda plana, perpendicular a la apertura, y que cada punto de la apertura se comporta como una fuente puntual. El patrón de difracción entonces se modela como el patrón debido a la interferencia de la radiación emitida por esas fuentes puntuales.

Una onda plana puede ser generada experimentalmente por un láser colimado, o por una lámpara de luz blanca. En este último caso hay que poner el punto de observación a distancia grande del punto de emisión de la luz con el fin de obtener sólo rayos paraxiales (en la aproximación paraxial las trayectorias de los rayos de luz forman ángulos pequeños con el eje óptico, siendo el eje óptico perpendicular al plano de la imagen, pudiéndose así aproximar el seno y la tangente de un ángulo por el ángulo mismo).

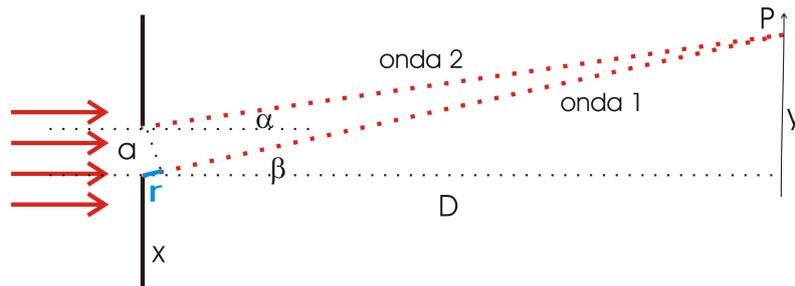


Figura 4: Difracción por una rendija simple

Como se representa en la figura 4, se consideran los distintos puntos de la apertura como emisores de ondas puntuales. Consideramos las dos ondas 1 y 2 que salen de la apertura con ángulos β y α respectivamente y que llegan al punto de observación P . Si la distancia D entre el plano de la rendija y el plano de observación es mucho mayor que el ancho a de la apertura, se puede asumir $\beta \simeq \alpha = \theta$ y $r = a \sin(\theta)$ es la diferencia de camino óptico entre 1 y 2. Las dos ondas (1 y 2) que llegan a P interfieren de forma destructiva o constructiva, dependiendo de la diferencia de fase entre ellas. El desfase ϕ entre 1 y 2 vale:

$$\phi = k * r = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\theta) \quad (1)$$

siendo k el número de onda y λ la longitud de onda.

La intensidad luminosa a una distancia D en función de θ presentará una serie de máximos y mínimos. Los mínimos se deben a la interferencia destructiva entre todas las ondas planas difractadas por la rendija que llegan en el punto P .

La intensidad de luz es igual al valor medio del cuadrado del campo eléctrico de la onda. Se demuestra que la expresión de la intensidad de luz (en función del ángulo θ) vale:

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

siendo I_0 la intensidad de la luz incidente y $\text{sinc}(y) = \frac{\sin(y)}{y}$

Los puntos con intensidad mínima satisfacen entonces la relación:

$$a = \frac{m\lambda}{\sin(\theta)} \quad (3)$$

Como la distancia D es grande respecto al ancho de la rendija y el ángulo θ es pequeño, se puede asumir $\sin(\theta) = \tan(\theta)$. Las posiciones en y con mínimo de intensidad de luz satisfacen entonces:

$$Y = \frac{Dm\lambda}{a} \quad (4)$$

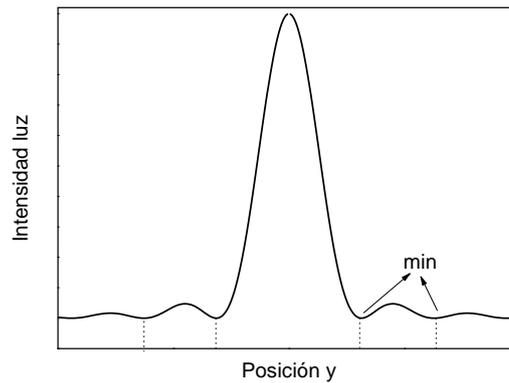


Figura 5: Perfil de intensidad de la luz difractada por una rendija simple

La ecuación 4 permite determinar el ancho de la rendija al conocer la longitud de onda de la luz y el patrón de difracción.

La figura 5 representa el perfil de la intensidad de luz en función de la posición en y (en la figura son señalados los puntos con intensidad mínima).

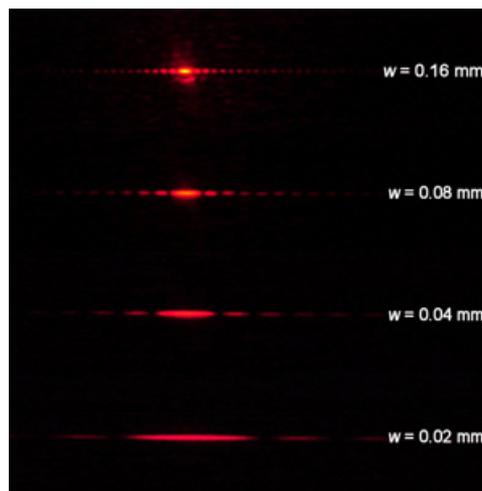


Figura 6: Patrón de difracción de la luz a través de una rendija simple (w es el ancho)

En la figura 6 se muestra el patrón de difracción de la luz de un láser rojo en función del ancho de una rendija rectangular (w es el ancho a de las

ecuaciones 2 y 4).

La distancia entre los mínimos de luz es la misma para un patrón de difracción causado por un objeto opaco del mismo espesor del ancho de la rendija. Lo interesante de la difracción por un objeto opaco es que en el punto de observación justo atrás del objeto habrá luz, y no sombra como surgiría de la aproximación de la óptica geométrica.

3.1.2. Difracción por una red

Una red de difracción es un conjunto de elementos difractores igualmente espaciados. Existen redes por reflexión y redes por transmisión de la luz. Las que se usarán en la clase transmiten y reflejan al mismo tiempo. Para analizar la difracción de una red, se considerará el caso de la difracción producida por un conjunto de rendijas de igual ancho b situadas todas en un mismo plano y espaciadas regularmente una distancia c . El patrón de la luz transmitida por la red está caracterizado por dos términos: la intensidad de la difracción producida por una rendija de ancho b , y la intensidad debida a la interferencia de N rendijas (de ancho b) separadas una distancia c . Como efecto de la interferencia de las ondas difractadas, se pueden observar m diferentes órdenes de ondas que se mueven desde la red, como se muestra en la figura 7.

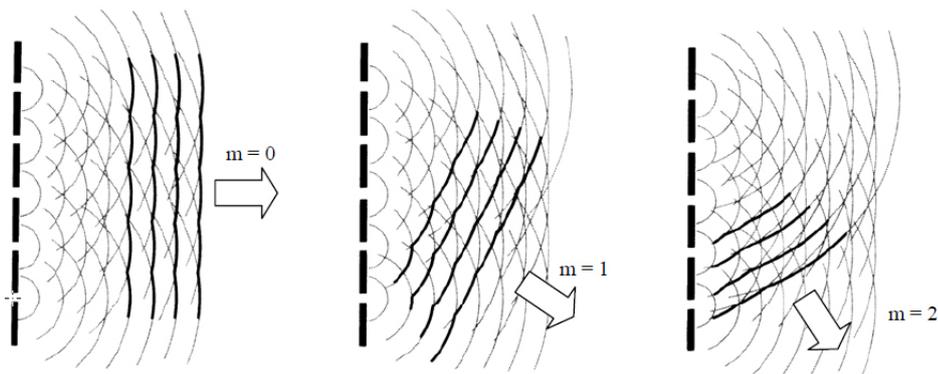


Figura 7: Frentes de ondas difractadas por una red

La expresión de la intensidad de luz del patrón de difracción es:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{N^2} \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin(N\alpha)}{\sin(\alpha)} \right)^2 \quad (5)$$

donde N es el número de rendijas simples, β la diferencia de fase entre las ondas difractadas por una rendija simple y α es la diferencia de fase entre las ondas difractadas por las N rendijas.

Las figuras 8 y 9 muestran la distribución de intensidad y la foto del patrón generado hasta el orden 1. El patrón de la luz difractada consistirá en una serie de franjas brillantes, correspondientes a los máximos principales de la interferencia de N fuentes. La relación entre los máximos de distintos ordenes vale:

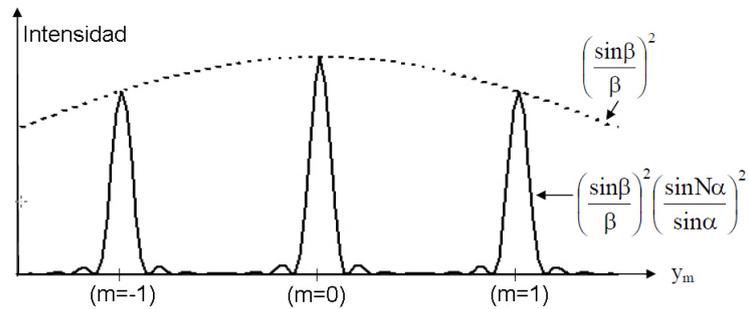


Figura 8: Perfil intensidad de luz difractada por una red

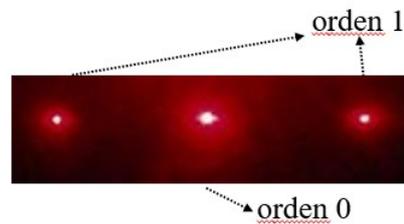


Figura 9: Foto del patrón de luz monocromática difractada por una red

$$\sin(\theta) = \frac{m\lambda}{c} \quad (6)$$

Las redes se identifican a través del número de rendijas por milímetro. Las mismas pueden ser construidas de forma de mostrar solo uno o más órdenes de difracción.

En el caso que la luz incidente en la red sea compuesta por varias longitudes de onda, cada una tendrá diferentes valores de θ , y en el punto de observación aparecerá el espectro de las diferentes componentes de la luz, como se muestra en la figura 10.

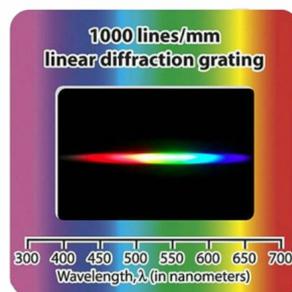


Figura 10: Patrón de luz blanca difractada por una red

4. Realización de la experiencia

Para realizar esta práctica contaremos con un láser de baja potencia (< 5 mW) y una red de difracción bidimensional. Además se analizará la difracción producida por un obstáculo, utilizando para ello un cabello.

El láser con el que trabajarán es de baja potencia y no produce daños severos, de cualquier modo es importante cuidar de no apuntarlo a los ojos.

4.1. Difracción por una red y medida de la longitud de onda del láser

La red de difracción que tienen a disposición es una red bidimensional de 5000 líneas por pulgad. Consiste de una malla compuesta por una secuencia de rendijas en los ejes x-y. El comportamiento de esta red es equivalente al de una red unidimensional pero se observará difracción en el plano, a lo largo de las dos direcciones perpendiculares x-y. La figura 11 muestra el orden de difracción correspondiente a cada punto luminoso, a partir del punto central del patrón que corresponde al orden cero. La red debe mantenerse limpia, por lo que deberán tomar cuidado cuando la agarran y tratar de no tocarla. Si la red está sucia puede llegar a alterarse el patrón de difracción.

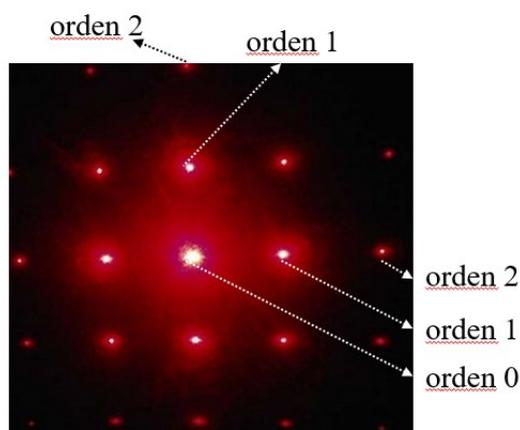


Figura 11: Perfil de intensidad de luz difractada por una red bidimensional

- Discutir en grupos como debe realizarse el montaje experimental para poder obtener medidas que permitan determinar como resultado final la longitud de onda del láser. Piensen específicamente en los detalles a tener en cuenta relacionados con la alineación del láser, la red y la pantalla.
- Analicen que magnitudes pueden variar y cómo, para poder tomar una serie de medidas que permitan obtener el valor de la longitud de onda del láser usando mínimos cuadrados.

4.2. Difracción por un cabello

- Poner un cabello tenso en el soporte y hacer incidir el láser sobre el mismo. Qué patrón de difracción espera que aparezca en la pantalla?
- Optimizar la visibilidad del patrón de difracción variando la distancia cabello-pantalla. Es probable que en este caso la distancia objeto-pantalla necesaria para ver un patrón nítido sea bastante mayor que en el caso de la red. Por qué?
- Analice cuáles son las magnitudes que debe medir, para obtener una serie de datos que permita calcular el espesor de cabello (usando mínimos cuadrados u otro método).

5. Difracción usando un DVD como red de difracción (opcional)

Un DVD, al igual que un CD, consiste en un disco plástico transparente en el cual se han marcado indentaciones siguiendo un circuito en espiral, como se muestra en la figura 10. La secuencia de los agujeros constituye la información contenida en el disco. Sobre el disco se deposita una placa metálica de protección.

Las líneas de la espiral, cuya distancia entre ellas es del orden del micrómetro, se comportan como una red de difracción.

La distancia entre los máximos del patrón de difracción de la luz generado por un DVD permite determinar la distancia entre las pistas (líneas), según la ecuación 6.

Para usar un DVD como red de difracción por transmisión es necesario remover la película metálica, para que sea transparente. El DVD está formado por dos piezas: una protectora y la que contiene la red de difracción. La pieza que contiene la información es la que se encuentra más próxima al lector láser de, por ejemplo, una computadora. Estas se pueden separar fácilmente con una trincheta (hay información en la red).

Colocando el haz del láser perpendicular al DVD, se observa en la luz transmitida un patrón de difracción de orden uno, que nos da información acerca de la separación entre las pistas del DVD. Como el diámetro del haz es en general del orden del milímetro, en la superficie del disco iluminada pasarán alrededor de mil pistas de la espiral.

El experimento se puede realizar también con un CD, pero en este caso puede resultar más difícil remover la película metálica de protección. En el caso del CD tendría que observarse un patrón de difracción de orden dos.

Determinar la distancia entre las pistas de un DVD. Comentar si el resultado obtenido es coherente con lo esperado.

6. Pauta para el análisis de los resultados y para la elaboración del informe

A continuación encontrarán la pauta general para el reporte de la práctica 2. Se mantiene el mismo enfoque que en el primer informe buscando que el énfasis

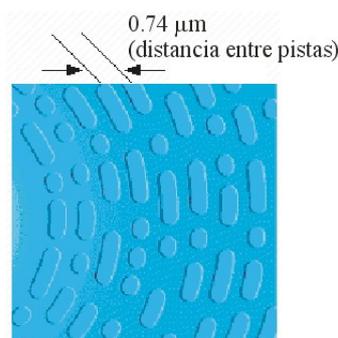


Figura 12: Pistas de un DVD

esté en el armado de la experiencia y la realización de las medidas, así como en el análisis de resultados.

- **Formato general 1 punto:** Incluye: organización, contenido general del reporte, redacción y ortografía. Las gráficas deben estar correctamente presentadas, con pie de figura y citadas en el texto.
- **Introducción 1 punto:** se describen brevemente los objetivos. Deben explicarse únicamente los conceptos y ecuaciones más importantes que sean necesarias para el desarrollo de la práctica. Mencionar que hipótesis se realizan, rango de validez de las aproximaciones, etc.
- **Metodología 2 puntos** Bien explicada, con esquema del dispositivo (pueden colocar fotos si aporta información relevante) y consideraciones a tener en cuenta durante la práctica. Es importante relacionar con las hipótesis del modelo teórico, así como dar los detalles importantes relativos a como se deben armar el dispositivo y tomar las medidas para cumplir con estas hipótesis. Indicar claramente las magnitudes medidas y su correspondiente incertidumbre.
- **Análisis de datos A - Red de difracción: 2.5 puntos** Se evalúan los datos experimentales obtenidos y la gráfica de estos datos con sus barras de incertidumbre junto con el modelo teórico, además del análisis de los resultados. Se espera que se realice un ajuste por mínimos cuadrados de los datos obtenidos y se obtenga el valor de la longitud de onda del láser con su incertidumbre. Este resultado debe ser comparado con el valor del fabricante. Se deberán analizar fuentes de incertidumbre, diferencias en el montaje respecto al modelo teórico, etc.
- **Análisis de datos B - Difracción por un objeto opaco: 2.5 puntos** Se evalúan los datos experimentales y la gráfica con estos resultados, que incluya barras de incertidumbre. Se deberá obtener un valor para el espesor del cabello usando mínimos cuadrados o estadística, y presentar resultados analizando posibles causas de incertidumbre.
- **Conclusiones 1 punto** Detalladas y explicadas, ligadas a los objetivos de la práctica y vinculando con el modelo y las hipótesis realizadas.

- Anexo con las tablas con los datos experimentales relevados, incluyendo sus incertidumbres y unidades.

Referencias

- [1] S. Gil y E. Rodríguez, Física re-Creativa, Prentice Hall (2001)
- [2] E. Hetch, Optics, 2nd Ed, Addison-Wesley (1987)
- [3] H. Moysés Nussenzveig, Curso de Física básica, Óptica, Editoria Edgard Blucher (1998)
- [4] A. Tippie y T. Lee, Experiments with diffraction, www.optics.rochester.edu
- [5] J.P. Sánchez Fernández, Difracción de la luz: comparación experimental de la capacidad de almacenamiento de un CD y de un DVD (2006), <http://e-spacio.uned.es/fez/view/bibliuned:revista100cias-2006-numero9-5160>