
EXPERIENCIAS DE OPTICA FISICA: Usando el disco compacto como difractor

PESA, M. A., JAEN, M. y CABRERA, M.

Instituto de Física - Fac. de Ciencias Exactas y Tecnología (U.N. de Tucumán) - Independencia 1800 - 4000 Tucumán

INTRODUCCION

Las investigaciones educativas de las últimas décadas han señalado la importancia de transformar los contenidos que la enseñanza tradicional transmite como un conocimiento cerrado y acabado, en programas de actividades estimulantes, a través de las cuales los estudiantes puedan construir los conocimientos científicos, adquirir destrezas y cambiar su visión del mundo (Calatayud Alexandre et. al. 1988).

Preocupados por plantear actividades que generen un interés preliminar en la tarea, al vincular la Física del aula con los nuevos avances tecnológicos que forman parte de las vivencias diarias de nuestros alumnos, se propone un conjunto de experiencias que utilizan un disco compacto de audio (CD) y que permiten una mejor conceptualización de los fenómenos de interferencia y difracción de la radiación luminosa.

La información impresa en el CD, a lo largo de una estructura en forma de espiral como pozos de diferentes longitudes e intervalos entre pozos, se comporta como elemento difractor y produce interesantes efectos al incidir sobre ella tanto un haz de luz blanca, como un haz monocromático de luz láser.

En efecto, los CD presentan efectos de difracción óptica observables en forma directa. Este fenómeno nos permite obtener información respecto a las dimensiones de la estructura que produce la difracción de la luz (sobre la que está codificada la información) o bien medir la longitud de onda de la radiación incidente.

A pesar de que la pista no es un sistema periódico regular, la distribución de los pozos es suficientemente uniforme como para garantizar

las condiciones de coherencia de los haces reflejados en la superficie del CD y asegurar un patrón de interferencia observable.

Se proponen entonces experiencias de Optica Física utilizando como red de difracción la superficie del disco y fuentes de luz blanca y láser.

LA FISICA DEL DISCO COMPACTO

Comenzaremos realizando una breve descripción de los principios físicos involucrados en el funcionamiento del CD, especialmente en lo relacionado al procesamiento de la señal luminosa a través del disco, desde la fuente de luz láser hasta los fotodetectores (Heller N., Bentz T., 1991).

Este análisis implica la utilización de conceptos básicos de la óptica física y geométrica, tan importantes para el estudiante de ser presentados en conjunto, como partes integradas de un mismo problema real, y no como capítulos aislados de un programa sin ninguna conexión.

El registro del sonido en formato digital se logra por medio de la sucesión de los pequeños "pozos" y "valles" que se practican en la superficie del disco formando una espiral desde el centro al borde del CD.

Los parámetros característicos del CD (ver figura 1) y sus órdenes de magnitud son:

- * longitud del pozo: $0,833$ a $3,65\mu\text{m}$
- * profundidad del pozo: $0,11\mu\text{m}$
- * distancia entre pistas adyacentes: $1,6\mu\text{m}$
- * longitud total de la pista: 5km
- * ancho del pozo: $0,5\mu\text{m}$

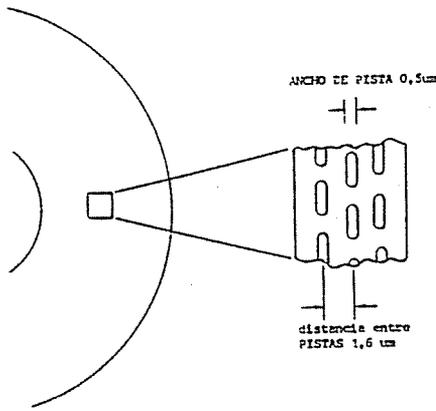


Figura 1

Es interesante que los estudiantes averigüen los órdenes de magnitud de estos parámetros y hacer notar luego, cómo las dimensiones involucradas están íntimamente relacionadas con la longitud de onda de la luz utilizada (Cornwall M., 1993).

Como consecuencia del uso del láser como lector de la información, aparece la tremenda capacidad de almacenamiento de información de estos sistemas que supera ampliamente a sus antecesores.

La estructura básica del CD es una placa reflectora de aluminio muy delgada donde se practican los pozos, ésta se protege por "robustas" capas plásticas transparentes que no modifican en nada el registro, ni afectan la fidelidad de la grabación, otro avance frente a los sistemas anteriores (discos de pasta o cintas magnéticas). En el esquema de la figura 3 pueden verse los tamaños relativos de estos componentes.

La lectura de la información así grabada es, como ya se ha dicho, de tipo óptico-digital y está basada casi exclusivamente en el fenómeno de interferencia del haz de luz que se refleja en la superficie grabada del CD (Carasso M. et. al. 1982).

La fuente coherente de luz monocromática se enfoca en el disco (ver figura 2). Si la incidencia del haz de luz ocurre sobre la superficie plana, la interferencia de los haces reflejados será constructiva ya que los mismos estarán en fase.

En cambio si esta incidencia ocurre sobre una transición pozo-superficie, con profundidades de pozo que implican una diferencia de camino óptico de media longitud de onda de la luz utilizada, la interferencia será destructiva y la señal no se transmitirá al fotodetector.

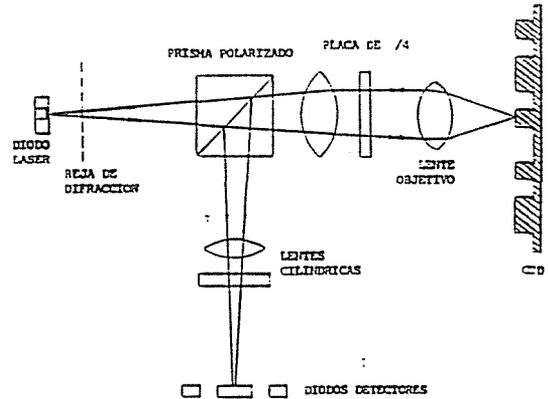


Figura 2

El fotodetector recibe finalmente estas secuencias que constituyen la información digital, que luego es nuevamente transformada a señal analógica y amplificada adecuadamente para poder ser escuchada por el oído humano.

La lectura de la información grabada en tan pequeñas dimensiones requiere que el haz sea focalizado en un diámetro suficientemente angosto para evitar la lectura de pistas adyacentes. Se utiliza una lente convergente de distancia focal muy corta para enfocar el haz a través de la capa transparente que separa la superficie externa del disco, de la superficie con la información (figura 3).

¿Cuál es el límite para este enfoque?. Aún cuando la lente no tenga aberraciones la difracción marcará el tamaño mínimo en que puede enfocarse el haz sobre la superficie del disco.

La figura de difracción será un disco de Airy y el radio del máximo central del mismo es la dimensión que está limitando la separación más pequeña en la pista. Las pistas vecinas están separadas exactamente de forma que cada pista se

ubica (figura 3) en un mínimo del patrón de Airy de la pista adyacente. Pueden estimar los estudiantes cuál es el máximo radio del primer máximo del patrón para no interferir la lectura (Heller N., Bentz T., 1991).

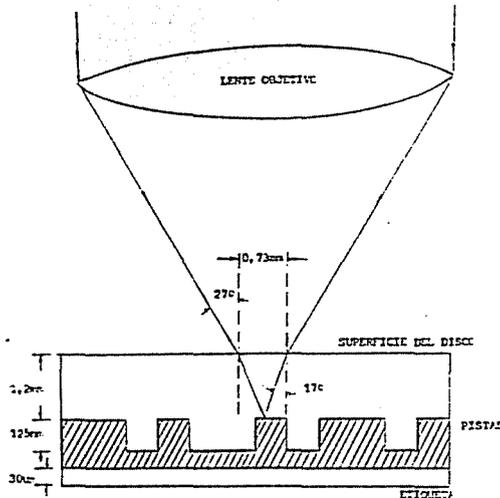


Figura 3

Conociendo la apertura del haz incidente, el índice de refracción del policarbonato ($\eta = 1,55$), el espesor de la capa plástica y la apertura del haz sobre el disco, puede estimarse el diámetro final R del haz de lectura. Entonces

$$2 \times 1,2\text{mm} \times \text{tg } 17^\circ = D$$

donde D es el diámetro del haz en la superficie externa, y

$$0,61\lambda / \text{sen } u = 0,61\lambda / \eta \cdot \text{sen } u' = 1,05\text{m} = R$$

donde R es el diámetro del haz en la superficie interna.

Se pueden comparar los dos resultados y discutir la razón de las discrepancias. ¿Cómo se modificaría la situación si en lugar de usar el láser infrarrojo de 780nm, se usa un láser azul de longitud de onda aproximadamente igual a la mitad?.

DIFRACCION CON LUZ BLANCA

En los discos fonográficos pueden observarse efectos de difracción de la luz en forma de zonas

coloreadas. En los CD este efecto es evidente desde cualquier ángulo, en cambio, en los de pasta sólo se perciben con ángulos de observación muy cerrados. Estos fenómenos serán utilizados en las experiencias que se proponen a continuación para obtener información respecto a las dimensiones de la estructura que produce la difracción de la luz y para medir la longitud de onda de la radiación incidente (Cornwall, 1993).

Experiencia 1

La experiencia propuesta utiliza como red de difracción la estructura en forma de espiral de la pista de un CD.

Se utiliza como fuente una lámpara incandescente, de 40W, potencia a partir de la cual puede hacerse una buena observación. La lámpara se coloca a una distancia mínima de 2m del observador, para asegurar las condiciones de "fuente alejada" y la coherencia espacial de la radiación incidente sobre el disco.

De espaldas a la fuente, un observador sostiene el CD a la altura de los ojos y a unos 20cm de los mismos, ajustando su posición hasta que la reflexión de la fuente de luz desaparece en el centro del CD (Ver figuras 4 y 5). En esas condiciones la simetría circular de la red permite la observación de un patrón circular en los bordes del CD.

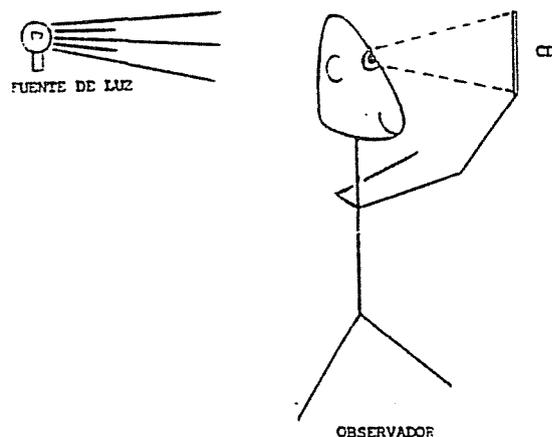


Figura 4

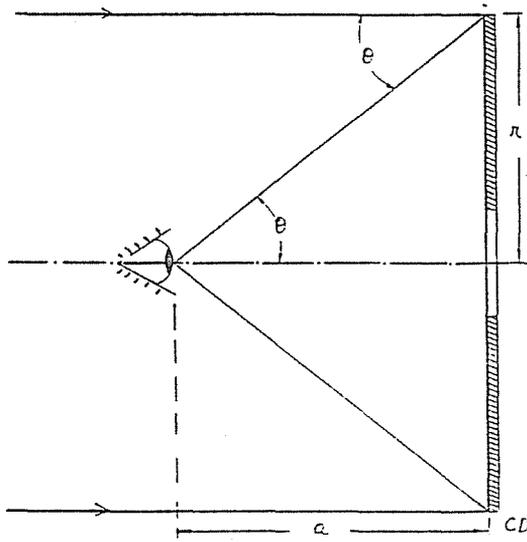


Figura 5

Aún más, si se varía la distancia de separación entre el ojo y el CD, se modifica la diferencia de camino óptico de la radiación reflejada, pudiéndose observar que el color del patrón varía entre el rojo y el violeta.

Si se conoce la longitud de onda incidente λ , el radio del CD ($r=5,5\text{cm}$) y la distancia del ojo al CD, puede entonces medirse el espaciado entre pistas con una precisión del 50%. Si bien éste es un error alto, y más que una medición es una estimación, puede mostrarse a los estudiantes que han podido llegar a conocer la estructura fina y microscópica de un CD, utilizando solamente regla milimetrada.

La figura 6 representa un diagrama a partir del cual pueden analizarse las condiciones de interferencia constructiva, ello implica que la diferencia de camino óptico de la red, sea un número entero de longitudes de onda, o sea:

$$d \sin \varphi = n\lambda$$

De las figuras 5 y 6:

$$\frac{b}{n \lambda} = \frac{a}{r}$$

además:

$$(n\lambda)^2 + b^2 = d^2$$

de donde se deduce que:

$$d = n\lambda \sqrt{1 + \frac{a^2}{r^2}}$$

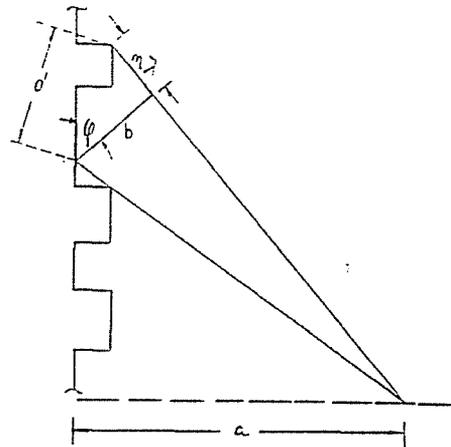


Figura 6

Dado que se fija la posición del CD sosteniéndolo con la mano del observador, basta la precisión de una regla para medir "a" (separación ojo-CD) con suficiente exactitud.

A manera de ejemplo ilustraremos los valores obtenidos en una medición, en la que se observa el máximo circular de primer orden correspondiente a la luz roja. En este caso:

$$\begin{aligned} n &= 1 & a &= 12\text{cm} \\ \lambda &= 650\text{nm} & r &= 5,5\text{cm}. \end{aligned}$$

de la que se obtiene $d=1,5\mu\text{m}$. El error en la determinación fue del orden de 50%.

DIFRACCION CON LUZ LASER

Experiencia 2

Utilizando una fuente láser HeNe (633 nm) y nuestro CD puede obtenerse un patrón de difracción claramente definido y más fácil de

medir que en el caso anterior.

El dispositivo experimental (figura 7) consiste en una fuente láser, una pantalla con un orificio central, por donde pasa el haz láser incidente y el CD.

El CD se mantiene sobre un soporte, y colocando la pantalla a unos 10cm del mismo, se hace incidir el láser sobre una región de pistas, de esta manera puede observarse sin dificultad dos órdenes de difracción sobre la pantalla.

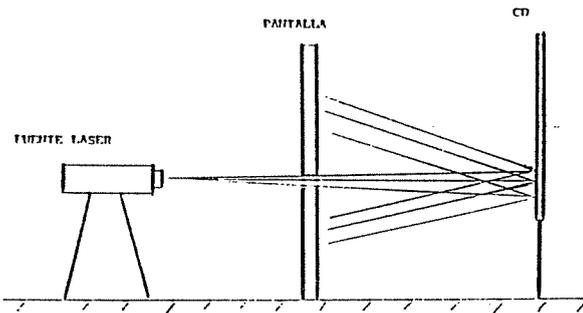


Figura 7

La experiencia cuantitativa puede plantearse a los alumnos de diferentes maneras: la determinación de la longitud de onda de la luz incidente (λ) conociendo las dimensiones del espaciado de la red de difracción, o bien, a partir del valor de $\lambda = 633\text{nm}$ para el láser de HeNe, encontrar cuál es el espaciado que está originando ese patrón que se observa.

Una primera observación cualitativa sobre la distribución de los máximos de diferentes órdenes sobre la pantalla permite concluir que la estructura de las pistas es la que produce el patrón observado.

Midiendo la posición del primer máximo en la pantalla respecto a la posición del haz incidente y la distancia de la pantalla al CD, puede determinarse la magnitud del espaciado entre pistas "d".

Modificando la distancia entre el CD y la pantalla

puede repetirse varias veces la experiencia para encontrar el mejor valor de "d".

Experiencia 3

Si se repite la experiencia anterior con un CD que no haya sido grabado, que sólo tiene un código de información de canales, pero ningún dato audible, se observará junto a cada máximo de difracción otro espectro menos espaciado perpendicular a la dirección principal de difracción. Para hacer visible este espectro, la pantalla de observación debe estar a más de 1m de distancia del disco.

Puede volver a observarse en estas condiciones un CD grabado y verificar que este patrón secundario no aparece. ¿Cuál es la estructura que lo origina?. ¿Por qué desaparece ésta al grabarse información en el disco?.

El disco virgen posee una estructura regular de pozos a lo largo de la pista que actúa como red de difracción en dirección perpendicular a la red que forma la pista. Es esta estructura la responsable de este tipo de efecto.

Aunque en este caso será más difícil hacer mediciones, puede estimarse la separación entre máximos.

Partiendo de la hipótesis de que la estructura regular de los pozos es la que origina el espectro secundario, se calcula la separación entre máximos del espectro de difracción y se puede comprobar que coinciden con los órdenes de magnitud medidos experimentalmente.

A continuación se detalla un cálculo de los valores predichos por la teoría. Sabiendo que:

distancia entre pistas $d = 1,6\mu\text{m}$
 distancia fuente pantalla $a = 1\text{m}$
 long. de onda de la radiación incidente $\lambda = 633\text{nm}$

y las condiciones de máximo de primer y segundo orden

$$d - \frac{x}{a} = n\lambda$$

de donde se estima

$$\begin{aligned} x &= 40\text{cm} && \text{para } n = 1 \\ x &= 80\text{cm} && \text{para } n = 2 \end{aligned}$$

valores que coinciden, dentro de los errores experimentales, con los encontrados experimentalmente para las posiciones de los máximos.

CONCLUSIONES

Un problema con el que nos enfrentamos los docentes al abordar la enseñanza de la Óptica Física es el desconocimiento por parte de los estudiantes de situaciones fenomenológicas cotidianas motivadoras que puedan constituirse en objeto de estudio. El advenimiento del Disco Compacto abre una perspectiva muy interesante en este sentido. Para la mayoría de los estudiantes de los ciclos básicos universitarios y terciarios es un objeto conocido que puede concentrar su interés.

De esta manera el estudio de la Física del CD, así como las experiencias propuestas permiten incorporar al aula temáticas actuales con un

tratamiento básico riguroso y a la vez estrechamente ligadas a los intereses de nuestros alumnos.

Creemos que la propuesta que aquí presentamos puede ser útil a los alumnos y colegas que afrontan la misma problemática. Por otra parte, consideramos que puede ser complementada con otros trabajos (Cudmani L. C. de, Salinas J., Pesa M., 1991; Cudmani L.C. de, Pesa M., Salinas J. y otros, 1990) que se elaboraron como transferencia de investigaciones educativas a la enseñanza-aprendizaje de la Óptica Física en un laboratorio de investigación dirigida en los ciclos básicos universitarios. En ellos rescatamos la importancia de una guía de actividades para desarrollar con los alumnos, en donde se destaque el interjuego entre la teoría y la experiencia, la introducción cualitativa de fenómenos cotidianos referidos a la Óptica Física, el análisis de las magnitudes significativas, la estimación de las dimensiones en juego para lograr las condiciones de coherencia, el análisis de los límites de validez de los modelos que utilizan y los supuestos que éstos introducen.

Referencias Bibliográficas

- CALATAYUD ALEIXANDRE M.L. y colab., 1988, "La construcción de las ciencias físico químicas" - Ed. Nau Llibres - España.
- CARASSO M., PEEK J., SINJOU J., 1982, "El disco compacto - Sistema de audio digital" Fascículo 82/83 de la *Serie Componentes Electrónicas y sus aplicaciones* - Inst. Internacional de Philips - Buenos Aires.
- COPE J., 1993, "The Physics of the compact disc" *Physics Education* Vol. 28.
- CORNWALL M., 1993, "CD means colourful diffraction" *Physics Education*, Vol. 28.
- CUDMANI L.C. DE, PESA M., SALINAS J., y otros, 1990, "Óptica Física Básica Estructurada alrededor del concepto de coherencia luminosa" - Ed. Univ. Nac. de Tucumán - Tucumán - Argentina
- CUDMANI L.C. DE, PESA M., SALINAS J., 1991, "Paradigmas en el aprendizaje de la Óptica Física - Resultado de una experiencia piloto" - *Revista de Enseñanza de la Física* - Vol.3 - N°1.
- HELLER N., BENTZ T., 1991, "Compact disc" - Ed. Paraninfo - Buenos Aires.