

Midiendo lo invisible



Fig. 1. Luz solar difractada por la superficie de un disco compacto.

Guillermo P. Ortiz

FCENA, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina

W. Luis Mochán

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Academia de Ciencias de Morelos

Observe un disco compacto (CD) o un videodisco digital (DVD). Notará que al menos una de sus superficies se verá plateada, como un espejo, capaz de reflejar la imagen de su entorno. Ahora, si el día es despejado, coloque el disco en algún lugar soleado tomando precauciones para no ver directamente el reflejo del sol, el cual podría cegarlo. Si el día no fuese soleado, podría iluminar el disco con alguna lámpara, mientras más intensa, pequeña y lejana, mejor. Incline el disco hacia uno y otro lado. ¿Nota las franjas de colores que aparecen sobre la superficie plateada del disco (ver figura 1)? ¿No le parecen bellísimas por su brillo y saturación? Seguramente podrá ver todos los colores del arcoiris, desde un violeta profundo hasta el rojo, pasando por el índigo, azul, verde, amarillo, naranja y una infinidad de colores intermedios, todos ellos más saturados que los del mismo arcoiris. Al mover el disco verá que estos colores bailan, se desplazan y giran, desaparecen y reaparecen en otra parte. Seguramente, le interesará saber ¿de dónde vienen estos colores? ¿cómo se producen? El origen de los colores en general es un tema fascinante de la física y su estudio ha contribuido a avances revolucionarios como fue el desarrollo de la mecánica cuántica durante la primera mitad del siglo XX. En general, el estudio del color de un cuerpo nos da información sobre su estructura electrónica, atómica y molecular, así como de su textura microscópica. Los colores de las estrellas nos dicen incluso de qué están compuestas y cómo se mueven. El surgimiento de colores de los discos digitales, dependientes de la orientación relativa entre la fuente de luz, la superficie y el observador, se conoce como *iridiscencia*, fenómeno íntimamente asociado a la naturaleza ondulatoria de la luz, a su *difracción e interferencia*. La iridiscencia, también

puede observarse en las burbujas de jabón, en las manchas de aceite sobre el asfalto mojado, en la concha nacar y en las conchas de otros moluscos (ver figura 2), en las plumas de algunas aves, en los ojos de los insectos, en los caparzones de algunos escarabajos, en algunas piedras semipreciosas, etc.

En la figura 3 mostramos un corte transversal de la superficie de un CD cuya información se guarda codificada mediante el grabado de un surco microscópico que forma una espiral. Si la desenrolláramos, esta espiral *tendría algunos kilómetros de longitud*, la distancia necesaria para poder codificar en forma binaria los 70-80 minutos que duran en total la decena de canciones que típicamente contiene. Claramente, para que quepa en la superficie del CD, el surco debe ser sumamente angosto y la distancia a entre surcos consecutivos debe ser extremadamente pequeña. El lector ¿ha visto estas líneas? Aunque cada centímetro cuadrado de la superficie está cruzada por miles de estos surcos, formando un arreglo periódico, éstos son tan angostos que son *invisibles* al ojo humano. Cuando luz de un color determinado atraviesa el sistema, emerge en varias direcciones, se *difracta*. La etimología del término *difracción* refiere al latín *diffractus*, romperse en pedazos.

Algunos fenómenos ópticos pueden explicarse como si la luz consistiera de haces de partículas que se propagan libremente en línea recta. Cuando dichas partículas chocan con una superficie, se reflejan como cuando una bola de billar choca con la banda de una mesa de carambola, obedeciendo por tanto la *ley de la reflexión*. En ocasiones también se transmiten, cambiando su velocidad y por tanto su dirección de propagación, refractándose de acuerdo a la *ley de la refracción* conocida como *ley de Snell*. En 1704 Newton explicó muchas de las propiedades de la luz postulando partículas de luz con distintos tamaños, uno para cada color, y con distintos grados de *refrangibilidad*. Basta con entender la propagación rectilínea de los rayos de luz y las leyes de la reflexión y refracción para explicar cómo for-

man imágenes los instrumentos ópticos como microscopios y telescopios, e inclusive, nuestros ojos. Sin embargo, hay fenómenos que no pueden explicarse satisfactoriamente más que recurriendo a la naturaleza ondulatoria de la luz. Uno de ellos es la iridiscencia asociada a la difracción.

Movimientos Ondulatorios

Seguramente, alguna vez durante su infancia se detuvo a jugar a la orilla de un lago de aguas tranquilas arrojándole piedras intentando hacerles dar varios saltos sobre la superficie del agua. Recuerde las ondulaciones producidas en la superficie, pequeñas olas que se alejaban en círculos concéntricos del punto donde impactaba la piedra. En éstas, las partículas de agua se movían hacia arriba y hacia abajo, subían y bajaban varias veces una distancia pequeña, sin alejarse de su posición inicial, mientras que la *señal* se propagaba a través de todo el lago alcanzando la orilla opuesta; un movimiento localizado da origen a un movimiento extendido capaz de transportar energía. Imagine una larga hilera de miles de fichas de dominó [ver referencia 1] cada una parada cerca de la siguiente; la caída de la primera, un movimiento local, empujaría a la segunda, la cual al caer empujaría a la tercera y así sucesivamente. Claramente, aunque las fichas, la materia, no se propague, su movimiento puede llegar inmensamente lejos. Así se propagan las olas en el agua; así se propaga la luz: como ondas.

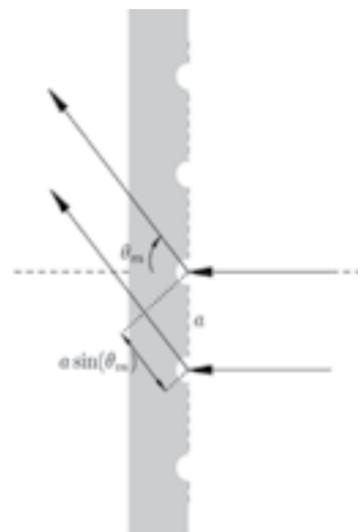


Fig. 3. Corte transversal de un CD, mostrando un arreglo periódico de muescas equiespaciadas sobre una superficie, cada una correspondiente a una vuelta de un largo surco espiral. Las muescas dispersan la luz en ciertas direcciones θ_m . Se indica la distancia a entre surcos consecutivos y la diferencia de longitud a $\sin(\theta_m)$ entre dos caminos ópticos sucesivos.

Regresando a las olas, imaginemos que simultáneamente caen dos piedras en el agua en lugares separados. Cada una será fuente de una onda en forma de un conjunto de olas concéntricas, cada cresta

seguida de un valle y luego de otra cresta, etc. ¿Qué pasa cuando llegan a un mismo punto ondas provenientes de las dos fuentes? Lo que observaríamos es que la altura de la superficie sería la *suma* de las alturas que produciría cada una de las dos ondas como si la otra no existiera; los movimientos simplemente se superponen. En algunos lugares llegarán simultáneamente dos crestas y más tarde dos valles, produciendo una cresta más alta y un valle más profundo. En otros llegará una cresta desde una fuente junto con un valle desde la otra y la suma algebraica de sus alturas se anulará. El primer caso se conoce como *interferencia constructiva* y el segundo como *interferencia destructiva*. Para entender más sobre estos conceptos aplicados a la descripción ondulatoria de la luz podría consultar la referencia 2. Una revisión histórica y formal de la explicación de la difracción de la luz puede encontrarse en la referencia 3. Durante algún tiempo se creyó que la luz era una especie de ola propagándose en un medio llamado *eter luminífero*. El desarrollo de la *teoría especial de la relatividad* [ver la referencia 4] llevó a la desaparición del eter: la luz es una onda curiosa que se propaga en el espacio vacío, sin medio alguno que ondula.

Difracción

Las ondas luminosas de color puro consisten en oscilaciones periódicas y pueden caracterizarse por su *longitud de onda*, denotada por el símbolo λ , que representa la distancia entre dos crestas contiguas de la onda correspondiente. En la figura 4 se muestran tres trenes de ondas que llegan a la superficie de un CD como la ilustrada en la figura 3, donde son dispersadas por las muescas. La luz incidente excita a los electrones del CD, partículas cargadas las cuales debido a su movimiento emiten luz secundaria. Cada muesca se comporta como una fuente de frentes de luz esféricos que se alejan de ella en todas direcciones, como las olas circulares que se alejan de una piedra que cae en el agua. En el panel izquierdo de la figura se ilustran las ondas que emergen en la misma dirección que la luz incidente. Notamos que todas las ondas secundarias que viajan en esta dirección *están en fase* e interfieren constructivamente, es decir, coinciden las crestas y valles de cada una con las crestas y valles de las demás. Esperamos por tanto que en dicha dirección la luz sea muy intensa. Este es el llamado *orden cero* de difracción. El panel central muestra ondas dirigidas en ciertas direcciones en las que las crestas de una onda corresponden a los valles de la siguiente, pues cada onda se adelanta una distancia $\lambda/2$ de la que le sigue. En estas direcciones la interferencia sería



Fig. 2. Iridiscencia en una concha de abulón.

destructiva y la intensidad luminosa sería nula. Por tanto, no hay luz difractada en esa dirección. En el panel derecho se muestra que la superposición se vuelve constructiva de nuevo cuando la diferencia entre cada onda y la que le sigue es de una longitud de onda completa. En general, hay interferencia constructiva y por tanto un haz luminoso intenso sólo en aquellas direcciones en las que la diferencia de camino óptico es un múltiplo entero de la longitud de onda $m\lambda$, dando origen a los órdenes de difracción con $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Observando la figura 4 y recordando nuestros cursos de trigonometría, obtenemos las direcciones correspondientes θ_m resolviendo la ecuación $a \sin(\theta_m) = m\lambda$.

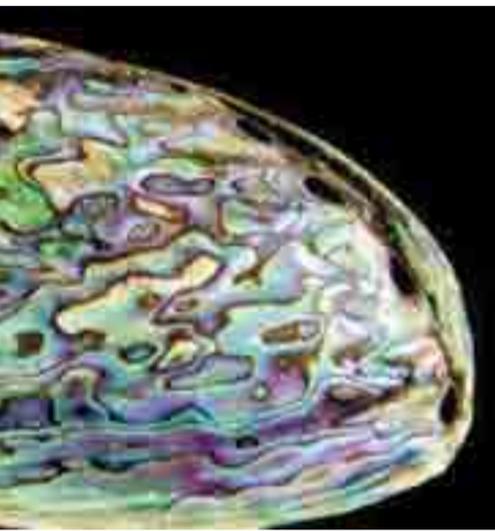
Como el seno de un ángulo no puede ser mayor que el número 1, esta ecuación sólo tiene unas pocas soluciones. Si la distancia a entre surcos fuera muy pequeña, la única solución sería $\theta_0=0$ y toda la luz se seguiría de frente, como si la superficie fuera plana. Por eso es que no podemos ver luz dispersada por un vidrio cuando este está pulido con un abrasivo fino, pero sí cuando está rayado con un abrasivo grueso. Notamos también que en la ecuación anterior, todos los ángulos, excepto el correspondiente al orden cero, dependen de la longitud de onda y por lo tanto del color. Es por esto que distintos colores se difractan en distintas direcciones, y por ello el disco se ve de muchos colores.

Experimento

Mencionamos arriba que los surcos en un CD son invisibles. Sin embargo, la magia de la física y un poco de matemáticas nos permitirán medirlos. Para ello, consiga un amigo y pídale un CD viejo, con música pasada de moda que ya no le interese volver a escuchar, y rómpalo. Será fácil quitarle a alguno de los fragmentos la película metálica que le proporciona su carácter reflector quedándose con un fragmento de plástico transparente. Consiga un apuntador laser (se suelen vender en las papelerías), ilumine el fragmento de disco transparente y proyecte la luz transmitida sobre el muro de un

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial @acmor.org.mx



tar que la luz *laser lo ciegue*, mida con una cinta métrica la distancia D entre el punto central y el primer orden de difracción. Con el laser apagado, mida también la distancia L desde el muro hasta el disco. Recordando ahora nuestros cursos de trigonometría, notamos que la tangente del ángulo θ , estará dada por el cociente $\tan(\theta) = D/L$. Como vimos arriba, $a \sin(\theta) = \lambda$, de donde podemos despejar la distancia entre surcos $a = \lambda / \sin[\tan(D/L)]$. La luz emitida por los apuntadores laser económicos suele ser roja, con una longitud de onda cercana a $\lambda = 650$ nanómetros (un nanómetro es una millonésima de milímetro). Los láseres verdes suelen ser más caros

y su luz tiene típicamente una longitud de onda de 532nm. En ocasiones, el laser tiene etiquetada su longitud de onda. Con estos datos y sus mediciones, ¿qué resultado obtuvo el lector? ¿Había medido Ud. antes alguna cantidad así de pequeña? Nosotros obtuvimos $a = 1.33$ micrómetros entre línea y línea (un micrómetro es una milésima de metro, i.e., una milésima de milímetro) correspondiente a casi 8,000 líneas por centímetro. Hemos mostrado cómo conociendo los atributos de la luz podemos medir cantidades minúsculas invisibles a nuestros ojos, como son los surcos microscópicos que guardan la música de nuestros discos com-

pactos. Análogamente, podríamos obtener las propiedades mismas de la luz midiendo su difracción por sistemas conocidos y bien caracterizados. Usando radiación electromagnética con longitudes de onda aún más pequeñas que las de la luz visible, como son los rayos X o los electrones, los cuales se comportan como ondas de acuerdo a la mecánica cuántica, podemos medir propiedades de objetos aún más pequeños, como son las moléculas y sus enlaces. Hemos ilustrado con este ejemplo como la física, que etimológicamente denota el estudio de la naturaleza, va mucho más allá de aquellos fenómenos que son directamente accesibles a nuestros sentidos. Agradecemos el apoyo recibido de DGAPA-UNAM IN108413.

Referencias

1. Hay un ejemplo en [url{https://www.youtube.com/watch?v=1QtdPzf_faM&src_vid=_1x99bOX7Yo&feature=iv&annotated_on_id=annotation_870679}](https://www.youtube.com/watch?v=1QtdPzf_faM&src_vid=_1x99bOX7Yo&feature=iv&annotated_on_id=annotation_870679)
2. E.Hecht and A.Zajac, *Óptica*, Addison-Wesley Iberoamericana, S.A., 1986.
3. J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill electrical and computer engineering. The McGraw-Hill Companies, Inc., second edition, 1996.
4. Alejandro Ramírez-Solís, *Einstein, la relatividad especial y la sincronización de relojes*, en diario *La Unión de Morelos*, Septiembre 2010, p. 34 y 35, <http://www.acmor.org.mx/?q=content/einstein-la-relatividad-especial-y-la-sincronizaci%C3%B3n-de-relojes>.

cuarto, de preferencia obscurecido, como muestra la figura 5. Seguramente podrá observar un punto luminoso central muy intenso y otros dos puntos a uno y otro lado un poco menos intensos. El punto central corresponde al orden de difracción 0 mientras que los dos puntos a sus lados corresponden a los órdenes 1 y -1. Quizás también pueda observar otros dos puntos más alejados, correspondientes a los órdenes 2 y -2. Ahora, midamos. Fije el disco sobre una mesa con su superficie paralela al muro e ilumínelo con la dirección del haz perpendicular al muro. Pídale a su amigo (seguramente, haber roto su disco no romperá la amistad) que *sin voltear hacia atrás para evi-*

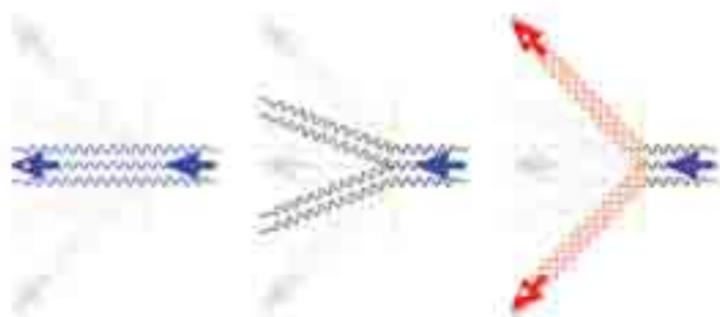


Fig 4. Un haz luminoso incidiendo normalmente sobre la superficie de un CD como en la figura 3. El panel izquierdo muestra en líneas resaltadas la interferencia constructiva correspondiente a la difracción de orden 0. El panel derecho muestra la interferencia constructiva correspondiente a la difracción de orden 1 y -1. El panel central muestra interferencia destructiva en direcciones intermedias.



Fig. 5. Luz de un apuntador laser difractada por la superficie un CD al cual se le ha retirado la película metálica. Se observan 3 puntos luminosos correspondientes a los órdenes 0, 1 y -1 de difracción.

TRIATLÓN

11 DE OCTUBRE

ARENA-TEQUEROS

ARRANQUE DESDE LAS 9 AM

COSTO \$350

RELEVO \$700

PAQUETE 10 octubre en Try Aspid de 9:00 am a 17:00 hrs

CATEGORIAS	TITULO DE CATEGORIA	HORARIO DE ARRANQUE	DISTANCIA
6-8 años	Letra: I	9:30am	50mts-400mts-200mts
9-11 años	Letra: IA	10:00am	150mts-4km-1km
12-13 años	Letra: IB	10:30am	150mts-8km-1.5km
Principiantes	Letra: P	10:30am	300mts-8km-1.5km
14-15 años	Letra: IC	11:00am	300mts-10km-2.7km
16- Mayores abierta	Letra: X	11:00am	600mts-10km-2.7km
Relévos	Letra: R	11:00am	600mts-10km-2.7km

www.triatlonaspid.com.mx

TELEFONO : 3185335 HORARIO : 9AM A 8PM RIO MAYO 304# COL. VISTA HERMOSA CUERNAVACA MORELOS

Ventas@triatlonaspid.com.mx Tryaspidasistencia@gmail.com Entrenador Lic. Edgar Fonseca Head Coach