
LOS PRINCIPIOS FISICOS DE LA HOLOGRAFIA

LUCIANO ANGEL T.
DANIEL VELASQUEZ P.

RESUMEN

La holografía es una técnica que permite reproducir una imagen tridimensional de un objeto. La imagen obtenida es tan completa que, en principio, ningún sistema óptico (ojo humano, cámara fotográfica, etc.) podría distinguirla del objeto original.

Aunque esta técnica se halla estructurada sobre un sólido marco teórico y el registro de un holograma plantea, por regla general, serios problemas experimentales, sin embargo, no nos detendremos en los detalles técnicos, ni agobiaremos al lector no especializado con pesadas discusiones físicas o expresiones matemáticas, puesto que nuestro propósito es acercarle a la comprensión de la holografía con base en sus principios físicos.

En este artículo iremos desde la discusión de algunas experiencias sencillas, hasta la comprensión de la idea clave de la holografía, en términos de los fenómenos de interferencia y difracción.

INTRODUCCION

La holografía es especialmente conocida como un medio para producir llamativas imágenes tridimensionales, que contienen todo el realismo de

los objetos registrados. Es una técnica que día a día esta siendo llevada a nuevas y muy diversas áreas de trabajo, que van desde aquellas que nos resultan más conocidas, por ejemplo, los hologramas de exhibición que encontramos tanto en museos como en publicidad, o aquellos utilizados en los sistemas de protección de documentos, hasta las aplicaciones de la holografía más especializadas, entre ellas la "interferometría holográfica", empleada como una herramienta para mediciones de alta precisión en áreas tales como metrología y ensayos no destructivos.

Aunque la holografía y la interferometría holográfica son técnicas ampliamente conocidas y utilizadas en los países desarrollados, para poderlas aplicar en nuestro medio es completamente necesario afrontar y solucionar las dificultades inherentes a su implementación. Por tal razón, la Universidad ha venido apoyando la realización de proyectos de investigación orientados al desarrollo de esta área, y en particular, a la posible utilización de la interferometría holográfica en la solución de problemas de la ingeniería.

LUCIANO ANGEL TORO. Físico y Magister en Física, Universidad de Antioquia. Profesor de la Universidad EAFIT.

DANIEL VELASQUEZ PRIETO. Físico, Universidad de Antioquia. Profesor de la Universidad EAFIT.

Al querer dar a conocer qué es la interferometría holográfica, nos hemos visto en la necesidad de escribir una serie de artículos de carácter divulgativo, que le permitan al lector comprender los principios físicos de la holografía, para luego entender cómo se hace un holograma, qué lo hace tan especial y finalmente, evaluar su potencial aplicación en diversos campos de la ingeniería.

1. PRINCIPIOS FISICOS

A diario participamos de un mundo lleno de colores, pero muy pocas veces tenemos plena conciencia de la existencia de la luz y de nuestra capacidad visual. Normalmente atendemos selectiva y descuidadamente a una mínima parte de las señales luminosas que recibimos, y sólo ocasionalmente nos planteamos algún tipo de interrogante sobre los mecanismos perceptivos o los efectos luminosos como tales. Claro está que ocasionalmente advertimos la magnificencia de un amanecer, el brillo molesto del televisor, o eventualmente nos damos cuenta que es hora de visitar al oftalmólogo.

Y ni qué decir acerca de cuán alejados de nuestro pensamiento se hayan los fenómenos ópticos estrictamente ondulatorios, responsables de innumerables efectos que de un modo u otro nos conciernen. Citemos por ejemplo, en relación con la interferencia de la luz, las bandas de colores de las pompas de jabón y de las manchas de aceite sobre el pavimento mojado, o el aspecto iridiscente de muchos insectos y aves. Análogamente, aunque poco o nada sepamos sobre la difracción y el láser, no obstante vivimos en un mundo en donde son comunes las unidades lectoras de códigos de barras de los supermercados y la reproducción musical de los discos compactos.

En esta misma línea de pensamiento, para apreciar una imagen holográfica, no es necesario ser un experto en la materia, tampoco asistir a un curso introductorio o recibir instrucciones previamente. Sin embargo, para comprender realmente en qué consiste la holografía y además, para percatarse de qué tan significativo y cuánto alcance tiene el hecho de poder reconstruir una imagen tridimensional, debemos adentrarnos en el terreno de los principios de la óptica física.

Inicialmente discutiremos someramente experiencias sencillas, entre ellas algunas que forman

parte de nuestra cotidianidad. Nos interesa citar los fenómenos físicos más relevantes e introducir las ideas claves para el desarrollo de las explicaciones subsiguientes.

1.1 Optica Geométrica

El concepto de "rayo de luz" es supremamente útil para explicar diversos fenómenos, siguiendo unas pocas leyes sencillas que indican el comportamiento de estos rayos, especialmente cuando se trata de situaciones que involucran exclusivamente una combinación de reflexiones y refracciones de la luz. De hecho, su relevancia en el análisis y diseño de instrumentos formadores de imágenes (microscopios, telescopios y binoculares, cámaras fotográficas, proyectores de diapositivas o acetatos, etc.), así como en muchas otras aplicaciones, es realmente indiscutible.

Un sistema muy simple que nos servirá para entender algunos de los principios de la óptica geométrica es el siguiente: Imaginemos que hemos construido una caja herméticamente cerrada, con paredes completamente opacas, excepto por un pequeño agujero practicado en una de sus caras. En lo sucesivo la llamaremos cámara oscura o de agujero.

A diario participamos de un mundo lleno de colores, pero muy pocas veces tenemos plena conciencia de la existencia de la luz y de nuestra capacidad visual. Normalmente atendemos selectiva y descuidadamente a una mínima parte de las señales luminosas que recibimos, y sólo ocasionalmente nos planteamos algún tipo de interrogante sobre los mecanismos perceptivos o los efectos luminosos como tales.

Si a usted no le extraña que la luz pueda entrar a través del orificio de la cámara, entonces estará de acuerdo en que la luz, no importa qué cosa sea, tiene la propiedad de desplazarse de un sitio a otro, desde el exterior de la cámara hasta el

interior de la misma. Notemos que al referirnos a la luz, la que nos “llega” desde sol, la que “entra” por la ventana o la que “sale” de la cavidad de un láser, para citar sólo algunos ejemplos, utilizamos un lenguaje que lleva implícita la idea de su propagación, esto es, de la posibilidad de ir de un lado a otro, de recorrer determinadas distancias, de avanzar a lo largo de ciertos caminos, etc.

La **Figura 1a)** ilustra cómo la luz emitida por una bombilla F pasa a través del orificio O y finalmente llega a un punto A, localizado en el interior de la caja y en el fondo de la misma.

Si el agujero es pequeño, pero no demasiado, se podrá constatar que la luz que entra a la caja continúa avanzando en línea recta, del orificio al fondo de la caja, en la misma dirección en la cual se propagaba antes, desde F hasta O. Advertiremos que es imposible ver la bombilla desde cualquier otro punto que no se encuentre sobre la línea FOA.

Al “hilito” de luz que va desde F hasta A se le denomina “rayo de luz” y geoméricamente se le representa mediante una línea, o mejor, con una flecha que indica la dirección en la cual viaja la luz. El rayo de luz es la noción básica de la óptica geométrica.

Posiblemente usted tendrá en mente otras observaciones referentes a la propagación rectilínea de

la luz, acaso pensando en la forma como los rayos solares se filtran a través de las nubes, o por estar familiarizado con la proyección geométrica de las sombras de los objetos.

Para percatarse de qué tan significativo y cuánto alcance tiene el hecho de poder reconstruir una imagen tridimensional, debemos adentrarnos en el terreno de los principios de la óptica física.

1.1.1 Reflexión

Otro hecho notable es la reflexión de la luz, sin la cual no podríamos ver nuestra imagen en el espejo, como tampoco veríamos la mayor parte de los objetos de nuestro entorno, incluido nuestro propio cuerpo.

Digamos que hay dos tipos de reflexión, dependiendo de qué tan pulida, o por el contrario, qué tan áspera sea la superficie en la cual rebota la luz. En una superficie muy lisa, cuya microestructura es muy fina, un rayo de luz rebotará en una dirección bien definida, dando origen a un único rayo reflejado, como se ilustra en la **Figura 2a)**. Este tipo de reflexión se llama “especular”, en relación con lo que ocurre en la superficie de los espejos.

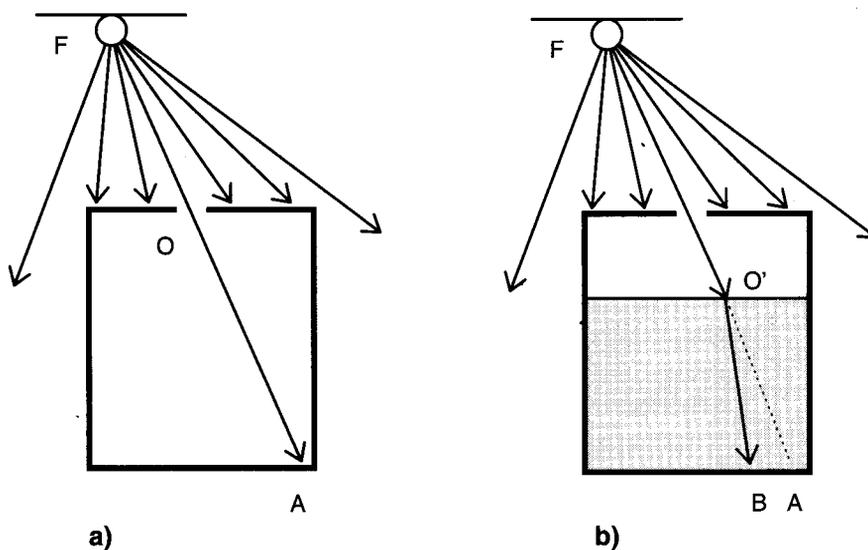


FIGURA 1
Cámara de Agujero: a) Propagación Rectilínea y b) Refracción de un Rayo

Pero, cuando la superficie que refleja la luz es rugosa (a nivel microscópico), como se muestra en la **Figura 2b**), la reflexión se denomina "difusa". En este caso el resultado es que la luz rebota en la superficie en múltiples direcciones, de modo que, prácticamente desde cualquier sitio desde donde se mire podrá observarse la luz reflejada en ese punto. Así pues, usted puede ver en detalle cada una de las letras de esta página, puesto que desde cada lugar de la misma se refleja luz difusamente en innumerables direcciones, y en particular, hacia sus ojos.

1.1.2 Refracción

Ahora retornemos al experimento con la cámara oscura: Supongamos que llenamos parcial o

totalmente la caja con algún líquido, por ejemplo agua. El resultado es que, aunque la luz avance a lo largo de una trayectoria bien definida dentro de la caja, no obstante ahora no llega al mismo punto de antes, puesto que cada rayo se desvía en la superficie del agua, al pasar de un medio a otro. Vea la **Figura 1b**).

Este fenómeno se conoce como "refracción de la luz", mediante el cual se explican, en buena medida, entre otros hechos, la disminución aparente de la profundidad de las piscinas (**Figura 3**), el que una vara recta introducida en el agua parezca doblarse, que las lentes funcionen del modo que lo hacen, o fenómenos tales como la formación del arco iris.

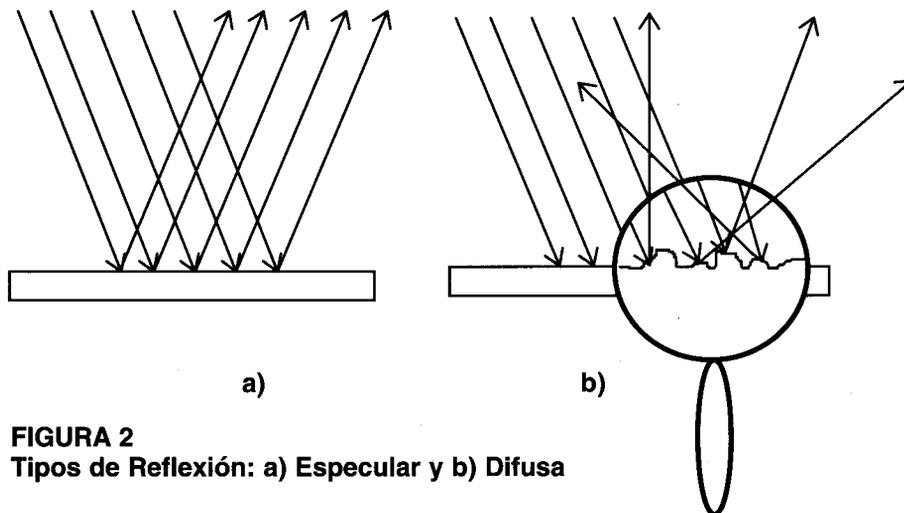


FIGURA 2
Tipos de Reflexión: a) Especular y b) Difusa

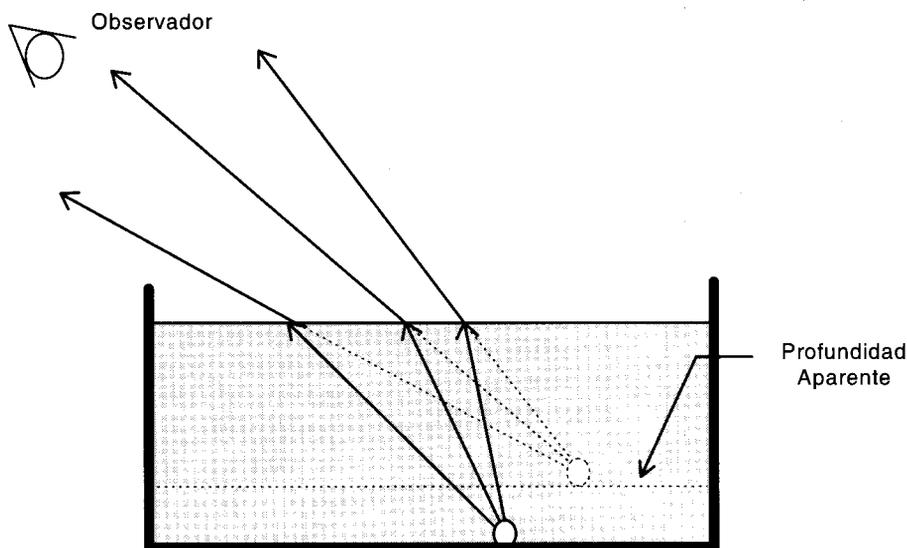


FIGURA 3
Efecto de la profundidad aparente, debido a la refracción

En última instancia, la refracción se debe a que la luz avance con una velocidad distinta en cada medio. Por ejemplo, es mayor su velocidad en el aire que en el agua y mayor en el agua que en un cristal. Naturalmente, no es tarea fácil medir la velocidad de la luz, dado que es inmensamente grande. ¿Ha pensado usted cuánto se demora la luz en llenar completamente una habitación cuando enciende una bombilla eléctrica?

Es particularmente significativo que la luz pueda viajar en el vacío absoluto, con una velocidad que, desde el punto de vista físico, es la mayor de entre todas las posibles: 300.000 kilómetros por segundo, aproximadamente. Para formarse una idea, en su viaje desde el sol hasta la tierra recorre cerca de 150.000.000 de kilómetros en unos 8 minutos. Si el espacio entre el sol y la tierra no estuviese en su mayor parte vacío, sino lleno de aire, se demoraría solamente algunas centésimas de segundo adicionales, en tanto que, si el mismo trayecto se realizara hipotéticamente dentro del agua, tardaría entre 10 y 11 segundos. De todos modos, propagándose en el vacío o en cualquier medio material, se trata de una velocidad inconcebiblemente alta.

1.1.3 Imágenes planas

Ahora veamos cómo mediante este modelo de rayos podemos entender la formación de imágenes planas.

1.1.3.1 Cámara de agujero

Una propiedad interesante de nuestra cámara oscura se remite a su utilización como cámara fotográfica:

La **Figura 4a)** ilustra cómo los rayos de luz provenientes de las fuentes F1 y F2 entran a la cámara en direcciones distintas, de modo que iluminan dos lugares diferentes, A1 y A2, en el fondo de la misma. Extrapolando este hecho, cuando se coloca un objeto convenientemente iluminado frente a la cámara, su superficie reflejará difusamente la luz, haciendo que entre a través del orificio un poco de luz proveniente de cada lugar del objeto. En consecuencia, en el fondo se formará una imagen plana de tal objeto, que como muestra la **Figura 4b)**, geoméricamente corresponde a una proyección del objeto sobre el fondo de la cámara. La imagen está invertida y puede tener mayor o menor tamaño, dependiendo de la distancia a la cual se halle el objeto, de su tamaño y de la profundidad de la cámara.

Note que en la **Figura 4a)**, se podría desplazar la fuente luminosa F1 hacia adelante, hasta la posición de F3, y le seguiría correspondiendo en el fondo de la cámara exactamente el mismo punto. Entonces, la distancia a la cual se hallen del agujero los diferentes puntos del objeto, no afecta para nada la imagen que se forma en el

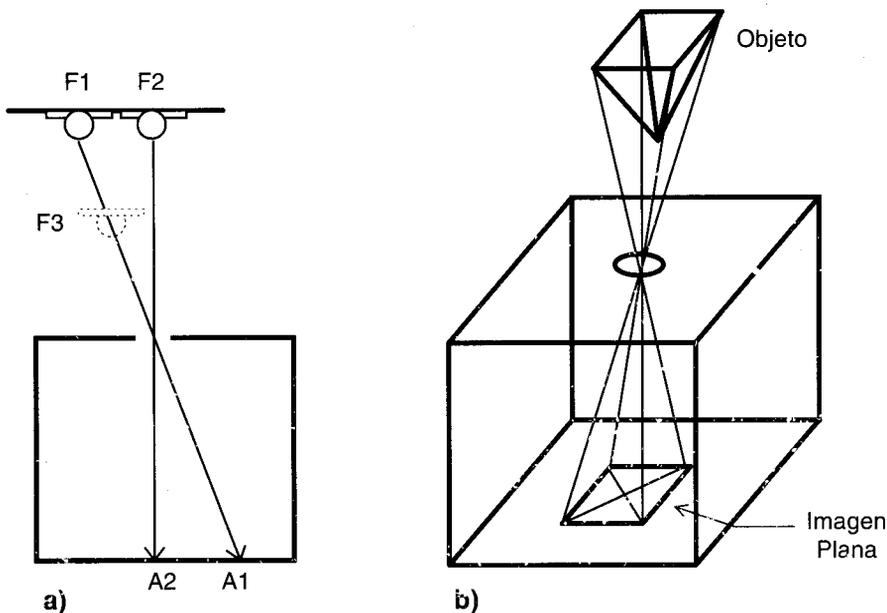


FIGURA 4

La Cámara Oscura: a) Luz de dos fuentes diferentes y b) Formación de una imagen

fondo de la cámara, así que la imagen no contiene propiamente la información relativa al volumen de los objetos ni a la profundidad de la escena que se halla en frente.

Ahora bien, podemos colocar en el fondo de la cámara una película fotográfica y permitir el paso de la luz a través del agujero durante cierto tiempo, luego seguir el proceso de revelado químico ordinario, para obtener finalmente una fotografía. Este tipo de registro tiene ciertas ventajas respecto a la fotografía convencional, especialmente en virtud de la profundidad de campo infinita de las imágenes, es decir, que tanto los objetos que se hallan muy cerca de la cámara, como aquellos muy distantes, aparecen igualmente nítidos en la fotografía.

Sin embargo, la utilidad de estas cámaras se ve fuertemente limitada debido a que el agujero debe ser pequeño, para garantizar que la imagen sea suficientemente nítida en conjunto, lo cual implica que el tiempo de exposición deba ser necesariamente muy largo. Usualmente debe permitirse el ingreso de la luz al interior de la cámara durante una o varias horas, puesto que, de otro modo, la mínima cantidad de luz que pasa a través del agujero no lograría sensibilizar apropiadamente la película fotográfica. Entonces, las escenas han

de ser fijas, como panorámicas, edificios, bodegones, etc.

Observe que en la **Figura 5a)** los conos de luz correspondientes a F1 y F2 no pierden su identidad en el registro, como si ocurre en la **Figura 5b)**, en donde se ha aumentado el tamaño del orificio, y en consecuencia, los conos de luz se han hecho más anchos. Por consiguiente podrán superponerse, de modo que las imágenes de las dos fuentes se confundirán.

1.1.3.2 Cámara fotográfica convencional

Aunque no puede aumentarse el tamaño del orificio de la cámara de agujero sin deteriorar notablemente la calidad de la imagen, si existe una solución ingeniosa al problema de mantener la nitidez de la imagen y a la vez permitir la entrada de una gran cantidad de luz a la cámara. Se trata de la utilización de una lente (o un conjunto de lentes) en vez del orificio.

Una lente refracta la luz que proviene de un objeto, de tal modo que todos los rayos que parten de un lugar determinado, después de cruzar la lente, finalmente se reúnen en un solo sitio. En la **Figura 6a)** se observa que la luz que viene desde el punto F, pasando a través de la lente MN, nuevamente se concentra en el punto A. Birlibirloque.

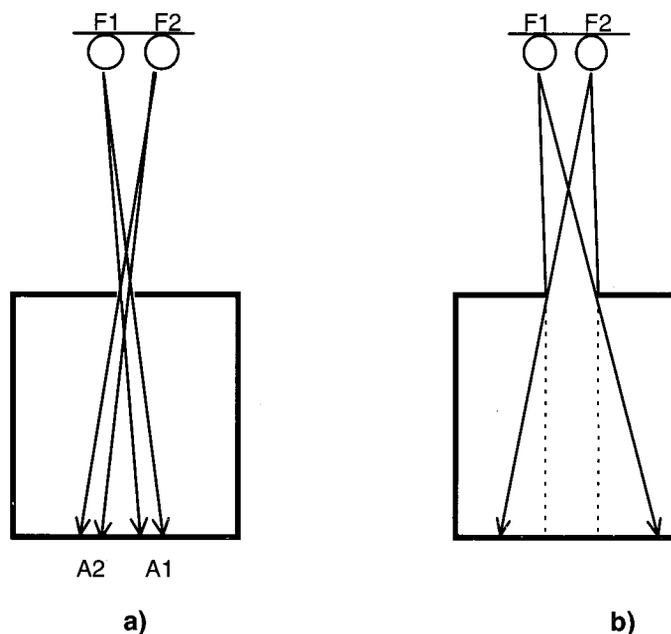


FIGURA 5
Efecto del tamaño del agujero en la nitidez de la imagen

Pero, aparte de las ventajas que tiene la cámara fotográfica convencional en comparación con la de agujero, las imágenes registradas mediante este tipo de dispositivos siguen siendo planas. Si eventualmente podemos inferir que los objetos registrados son tridimensionales, se debe exclusivamente a la idea que podamos formarnos con base en los contrastes de luz y sombra, los fondos difusos y la diversidad de matices, los tamaños aparentes de los objetos conocidos, etc.

1.2 Ondas

La noción de rayo y por supuesto su representación, únicamente hace referencia a la dirección en la cual se propaga la luz, dejando de lado otras características también importantes, entre ellas, el color, la intensidad, la amplitud y la fase. Dicho de otro modo, el concepto de rayo no se relaciona en modo alguno con la naturaleza misma de la luz, esto es, la definición del rayo no hace ninguna referencia directa a qué es lo que en realidad se propaga.

Ahora bien, en vista del carácter esencialmente "geométrico" de los rayos de luz, desde esa perspectiva no podemos abordar el estudio de algunos fenómenos que, como la interferencia y la difracción, se explican mediante la identificación de la luz con una onda. Por ello y dada la impor-

tancia que tienen la interferencia y la difracción en la holografía, a continuación nos referiremos a las ondas en general y a algunos efectos relativos a la naturaleza ondulatoria de la luz, evocando como antes algunos ejemplos sugestivos.

1.2.1 Olas en el agua

Aunque la definición de una onda es de por sí abstracta, para nuestro propósito bastará con sacar en limpio las ideas fundamentales, con base en algunas observaciones sobre hechos bastante ilustrativos y suficientemente conocidos por todos nosotros. Tomaremos como ejemplo el oleaje en la superficie del agua, que es un típico fenómeno ondulatorio.

Supondremos que lanzamos una piedra al centro de una piscina completamente reposada. Sabemos bien que la piedra altera la planitud de la superficie del agua al golpearla, produciendo bruscos movimientos del líquido alrededor del lugar en donde ha caído. También hemos visto que esta perturbación, inicialmente muy localizada, comienza a invadir toda la superficie de la piscina, avanzando en forma de anillos que van surgiendo y ampliándose rítmicamente a partir del centro (**Figura 7**). Este es el oleaje propiamente dicho, o bien, las ondas u olas que se propagan o avanzan sobre la superficie.

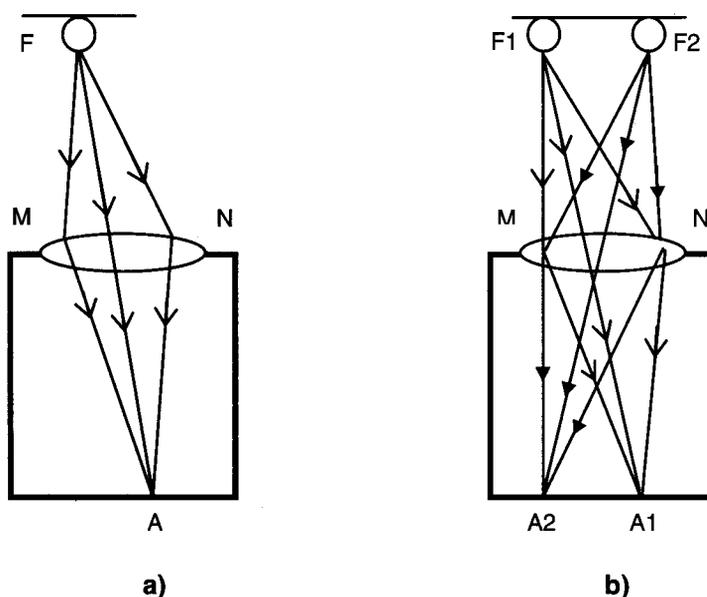


FIGURA 6

Cámara Fotográfica: a) La imagen de un punto y b) La imagen de dos puntos diferentes

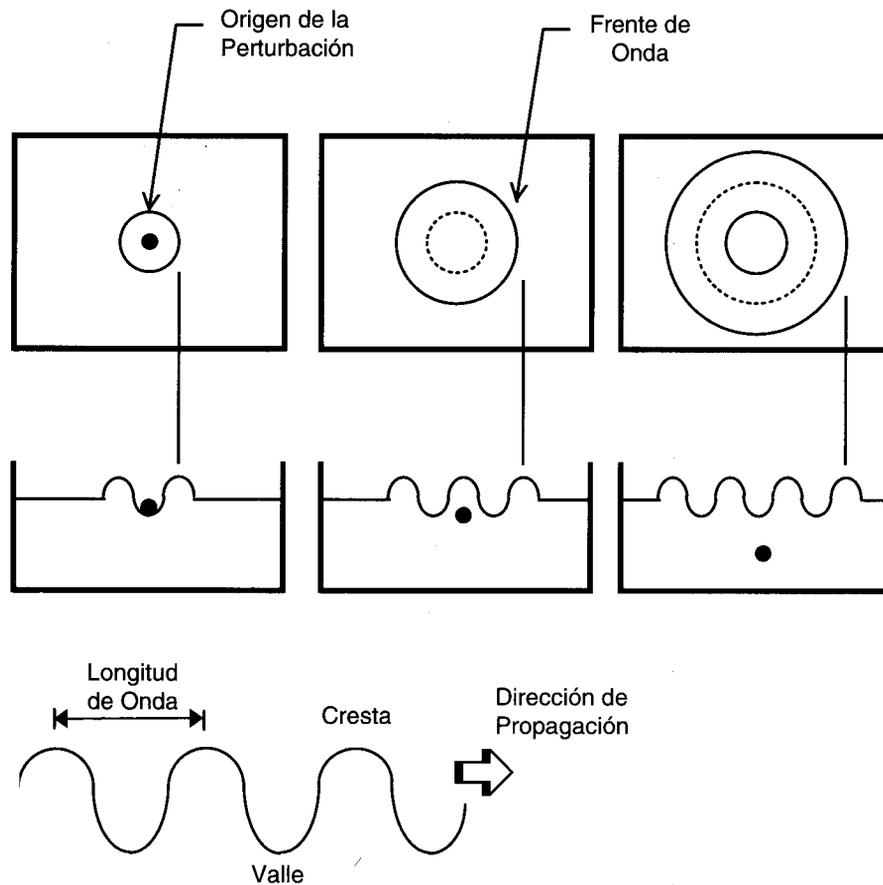


FIGURA 7
Avance de las ondas en la superficie del agua

1.2.1.1 El lenguaje que utilizamos

Llamaremos "cresta" a la parte más alta de la onda y "valle" a la depresión de la misma. Las crestas y los valles se suceden unos a otros y si observamos la superficie del agua desde encima, apreciaremos que las crestas (y los valles) se disponen en forma de anillos, cada uno caracterizado por una cierta elevación o altura del agua respecto a su nivel original. Llamaremos "frente de onda" a cualquiera de estos anillos, o en términos generales a una curva o una superficie, en donde la perturbación experimentada en cada instante sea común a todos sus puntos. La distancia entre las crestas de las olas es lo que denominamos "longitud de onda". Otra magnitud importante en el estudio de las ondas es la "velocidad de propagación", que se refiere a la rapidez con la cual avanzan los frentes de onda, que en nuestro caso son las crestas de las olas.

1.2.1.2 ¿Qué es lo que se propaga?

Para ahondar un poco más en el asunto, imaginemos ahora que en la superficie hemos colocado previamente algunos cuerpos flotantes, como por ejemplo, corchos de botellas. Observaremos que, al llegar las ondas al lugar en donde se encuentra un corcho, éste comenzará a balancearse, de arriba a abajo y viceversa. Sin embargo, es realmente curioso que el corcho no sea arrastrado por el oleaje y llevado rápidamente hacia el borde de la piscina. El corcho permanece prácticamente en el mismo punto, aunque agitando permanentemente al paso de las olas.

¿Por qué las olas no se llevan consigo el corcho? Aquí no hay ninguna contradicción: El asunto es que podemos confundirnos muy fácilmente al observar el oleaje en la superficie, dado que tenemos una fuerte tendencia, no sólo a seguir

con la mirada el movimiento de las crestas de las olas, sino también, a asociar este movimiento con un movimiento real del agua. Y es precisamente al hacer esta asociación cuando nos equivocamos, desconociendo la naturaleza misma del fenómeno ondulatorio, dado que lo que realmente se propaga desde el centro hacia afuera no es el agua, sino la perturbación que la superficie del agua ha sufrido a causa de la caída de la piedra.

1.2.2 Interferencia

Con base en el concepto de interferencia se explican una gran variedad de experiencias cotidianas, de las cuales somos partícipes en mayor o menor grado, como son el aspecto iridiscente de algunos insectos y aves, el colorido que presentan las pompas de jabón o las manchas de aceite y gasolina que se observan en el pavimento húmedo, o bien, algunas de las características del arco iris que normalmente pasamos por alto y que no responden simplemente a la refracción de la luz en las gotas de agua suspendidas en la atmósfera.

De otro lado, la interferencia de las ondas luminosas es un hecho fundamental, no sólo desde el punto de vista teórico, sino también, en relación con numerosas aplicaciones y desarrollos tecnológicos, por ejemplo, en las áreas de metrología, ensayos no destructivos y control de calidad.

En particular, un holograma es el resultado de un proceso en donde la interferencia de la luz desempeña un papel esencial, dado que la información allí registrada no se relaciona exclusivamente con las propiedades de una única onda, sino mejor, a la interferencia de la onda de interés con otra u otras ondas. Por esto se hace muy importante ahondar más en este tema.

1.2.2.1 Interferencia en el agua

La interferencia es un fenómeno que se presenta cuando dos o más ondas coexisten en una misma región del espacio, es decir, cuando simultáneamente se manifiestan varias ondas en un mismo sitio.

Por ejemplo, si a la piscina arrojamos dos piedras en vez de una, la superficie se verá afectada al mismo tiempo por dos perturbaciones distintas, originadas en dos sitios diferentes. Sin embargo, en aquellos lugares en donde se experimentan simultáneamente las dos ondas, la identidad de

cada una de ellas se pierde en cierta medida, al presentarse una nueva onda que reemplaza a las otras dos: Ya no se observan los mismos anillos de antes, y la altura de las crestas cambia apreciablemente de un lugar a otro. Hay lugares con un fuerte oleaje, mientras que en otros sitios la alteración de la superficie puede pasar inadvertida, o incluso permanecer sin ningún tipo de perturbación, como si las piedras no hubiesen sido lanzadas a la piscina.

Ello se explica asumiendo que los efectos de las ondas se refuerzan entre sí, o se contraponen, llegando incluso a anularse, dependiendo del lugar de la superficie que estemos observando. Pero, ¿En qué lugares se acentúa la ondulación y en qué lugares se atenúa? Para responder esta pregunta es conveniente que retomemos los conceptos de "amplitud" y "fase" de una onda:

1.2.2.2 Amplitud y fase

Ahora bien, el choque de la piedra contra el agua ha sido la causa del oleaje en la superficie de la misma, pero a su vez, la piedra ha perdido gran parte de su energía de movimiento. De otro lado, para producir olas de mayor altura necesitamos golpear con mayor vigor la superficie del agua, de modo que la piedra al caer le transmita una mayor cantidad de energía. Sin embargo, aunque la piedra prácticamente se haya detenido, la mayor parte de su energía no se ha perdido, sino que se ha transmitido al agua, encontrándose ahora en el movimiento de las olas.

La interferencia de las ondas luminosas es un hecho fundamental, no sólo desde el punto de vista teórico, sino también, en relación con numerosas aplicaciones y desarrollos tecnológicos, por ejemplo, en las áreas de metrología, ensayos no destructivos y control de calidad.

Debemos recordar que, a diferencia de una corriente en el agua, el avance de una onda no consiste en un movimiento global del líquido. Por el contrario, la propagación de una onda va

siempre acompañada de la transmisión de una cierta cantidad de energía y en consecuencia, complementando lo dicho anteriormente, se trata esencialmente un fenómeno de "transporte de energía".

En nuestro ejemplo, la "amplitud" de la onda se identifica con la altura de las crestas, siendo mayor la amplitud para las olas más altas y menor para los oleajes más débiles. Sin embargo, no es la amplitud la medida de la cantidad de energía que transporta la onda, sino mejor, su "intensidad", que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda en cuestión.

La "fase" de la onda se relaciona con el grado de elevación (o depresión) que experimenta la ola en un sitio determinado y en un momento dado. Puesto que en cada lugar se tendrán crestas y valles sucediéndose periódicamente, la fase de la onda

cambiará cíclicamente, a medida que pase el tiempo.

No nos extenderemos en mayores explicaciones sobre la definición de la fase de una onda, dado que el fenómeno que queremos explicar, que es la interferencia de varias ondas, se relaciona básicamente con la diferencia entre sus fases y no con las fases mismas. Nos ocuparemos luego de explicar la "diferencia de fase" entre dos ondas.

1.2.2.3 Interferencia constructiva y destructiva

Cuando las dos ondas llegan a un punto determinado de modo que las crestas de una de ellas coincida con las crestas de la otra, como se ilustra en la **Figura 8a**), se dice que las ondas están en fase, o equivalentemente, que la diferencia de fase de las ondas es cero. En este caso, las dos ondas se refuerzan entre sí, y la amplitud y la

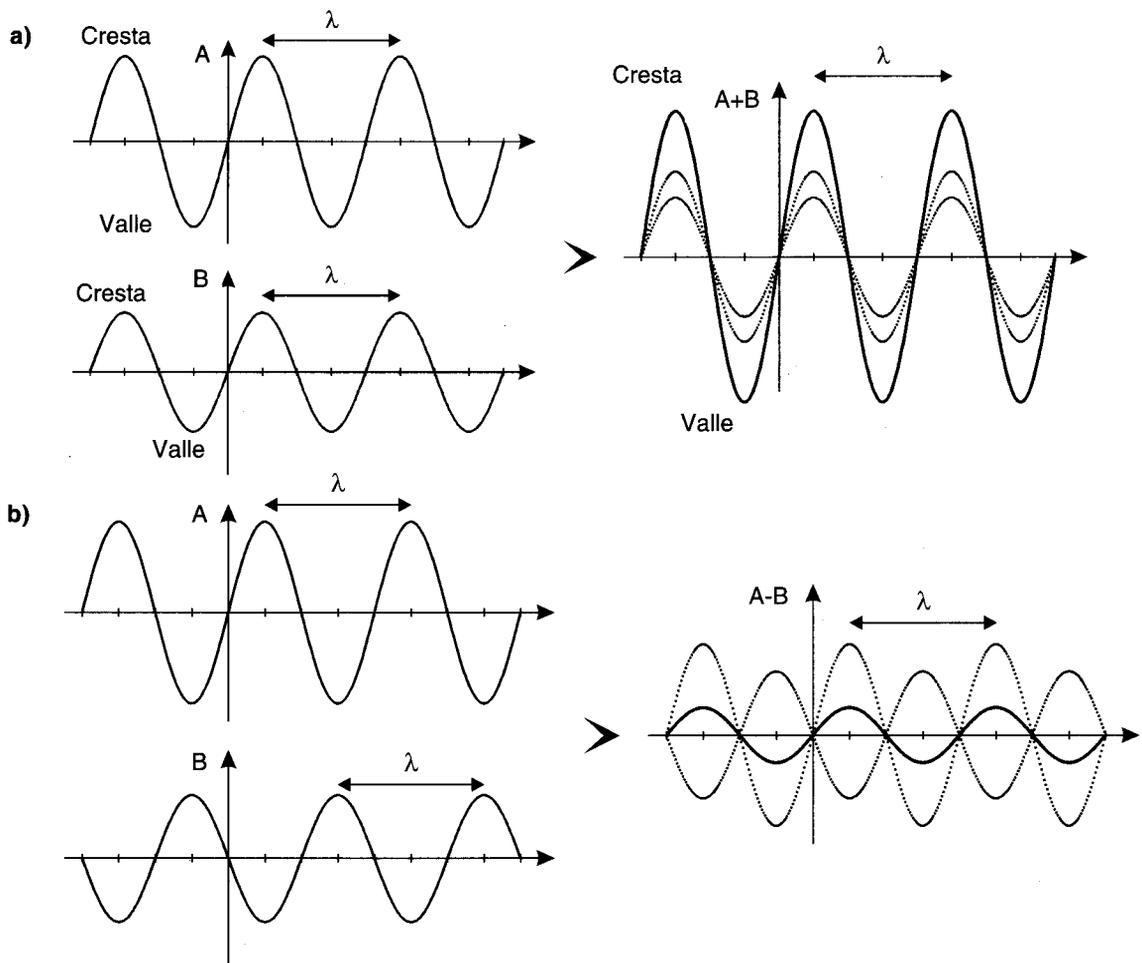


FIGURA 8
Resultado de la superposición de dos ondas: a) En fase y b) En contrafase

intensidad de la onda resultante son mayores que la amplitud y la intensidad de las ondas originales. Entonces se dice que las ondas interfieren constructivamente, o también, que se presenta una interferencia constructiva entre ellas.

Por el contrario, cuando las crestas de una onda coinciden con los valles de la otra, como en la **Figura 8b)**, el efecto de cada una de las ondas se contrapone al efecto de la otra, dando por resultado la anulación de la perturbación, o una onda con una amplitud muy pequeña. En este caso se dice que las ondas están en contrafase y que la interferencia entre ellas es destructiva.

Podremos visualizar mejor el resultado de la interferencia de dos ondas a partir de la **Figura 12a)**: Los puntos 1 y 2 representan los lugares en donde se han originado las ondas, comúnmente denominados fuentes. Los arcos de circunferencia corresponden a los frentes de onda y las flechas indican la dirección de propagación. Sin necesidad de incluir ningún truco en el dibujo, se observan unas bandas oscuras en la región en donde se superponen las dos ondas, es decir, en la zona en donde se interceptan los arcos correspondientes a los frentes de onda provenientes de 1 y 2. Las regiones oscuras pueden asociarse con aquellos lugares del espacio en donde la interferencia de las ondas es destructiva, mientras que las zonas más claras corresponden a los sitios de interferencia constructiva.

1.2.3 Propiedades ondulatorias de la luz

Hasta ahora nos hemos remitido frecuentemente al ejemplo de las olas en la superficie del agua, con el ánimo de retomar las propiedades que, a grandes rasgos, caracterizan el comportamiento de las ondas. Y aunque la mayor parte de lo dicho se puede extrapolar a la inmensa variedad de fenómenos ondulatorios, también es cierto que, a su debido momento, han de considerarse las singularidades de cada tipo de onda para llevar a cabo un análisis más completo. Desglosemos un poco este asunto: sabemos que cualquier tipo de onda, independientemente de cuál sea su naturaleza, experimenta, entre otros fenómenos, la propagación, la reflexión, la refracción, la interferencia y la difracción. Así mismo, podemos pensar en la detección de una onda sísmica, acústica, luminosa, o de cualquier otro tipo, podemos incursionar en el campo de la medición de la velocidad de propagación o la determinación de

cualquier otra magnitud física asociada con las ondas que estemos considerando.

No obstante, existen notables diferencias relacionadas con la diversidad de las ondas, esto es, con la especificidad de las propiedades de cada una de ellas, más allá de su caracterización como ondas en un sentido general. Baste recordar, por ejemplo, que tenemos órganos especializados para la detección de la luz y del sonido, así como disponemos de aparatos especiales para la detección de las ondas sísmicas o las ondas de radio. Acaso deberíamos preguntarnos por qué la luz no produce una vibración en el tímpano, ni el sonido desencadena una reacción química en la retina, para lograr una mejor caracterización de las ondas en cuestión.

La luz es una onda electromagnética, en donde la perturbación que se propaga corresponde a campos eléctricos y campos magnéticos. Teniendo en cuenta que estos pueden existir en el vacío, consecuentemente la luz no necesita un medio para propagarse, como si lo necesitan las olas "en el agua", el sonido "en el aire", las ondas sísmicas "en la tierra", etc. Similarmente, la identificación de la luz con las ondas electromagnéticas nos conduce a pensar que la intensidad de la luz está asociada con la "altura" de las "crestas" de las ondas, esto es, con la magnitud de los campos.

1.2.3.1 Los colores puros

El arco iris es uno de los fenómenos naturales más llamativos, ya sea por la espectacularidad de su colorido y porque siempre parece esconder a qué distancia se halla y cuál es su verdadero tamaño, o acaso porque se presenta cuando menos lo esperamos. En todo caso, sabemos que las características más representativas del arco iris se explican con base en la separación de los colores constituyentes de la luz solar, fenómeno conocido como la descomposición cromática, que en este caso se produce por la refracción en las gotas de agua suspendidas en la atmósfera.

Un experimento sencillo y muy conocido consiste en hacer pasar un rayo de luz a través de un prisma, con lo cual, el rayo refractado se abre en un abanico de colores. Este ejemplo nos servirá para relacionar algunas de las propiedades ondulatorias de la luz con los hechos observados.

En la **Figura 9**, el abanico de colores, desde el violeta hasta el rojo, cae dentro de un cierto rango de longitudes de onda, que van aproximadamente desde 0.39 micras (milésimas de milímetro) para el violeta, hasta 0.78 micras para el rojo. Por ejemplo, una longitud de onda cercana a 0.6 micras se relaciona con nuestra percepción del color amarillo, una alrededor de 0.5 micras con el verde, etc.

Pero, aunque esta gama de longitudes de onda corresponde a la luz que podemos ver a simple vista, es decir, sin ningún tipo de instrumentos, no obstante, la luz visible es únicamente una pequeña porción de un inmenso abanico de longitudes de onda, que se extienden por encima y por debajo de 0.78 y 0.39 micras, respectivamente. Las ondas de radio, las microondas, el infrarrojo, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X, etc., son las bandas que conforman, en un sentido más general, el arco iris electromagnético, denominado "espectro electromagnético".

1.2.3.2 La luz coherente y el láser

Un láser es un dispositivo cuya finalidad es producir una onda electromagnética con unas

características excepcionales. Esta radiación es conocida como "luz coherente".

La primera cualidad de la luz coherente consiste en el hecho de tener una longitud de onda precisa, de modo que resulta inútil cualquier intento por llevar a cabo una descomposición cromática de la misma, y en este sentido, se trata de un color puro.

De otro lado, frente a la luz emitida por un láser estamos en presencia de una inmensa cantidad de ondas elementales, que han sido emitidas individualmente por los átomos, en diversos momentos y posiblemente en direcciones distintas. Pero, en el láser, a diferencia de lo que ocurre con otras fuentes de luz, la emisión de los átomos se realiza de un modo controlado, lográndose con ello que

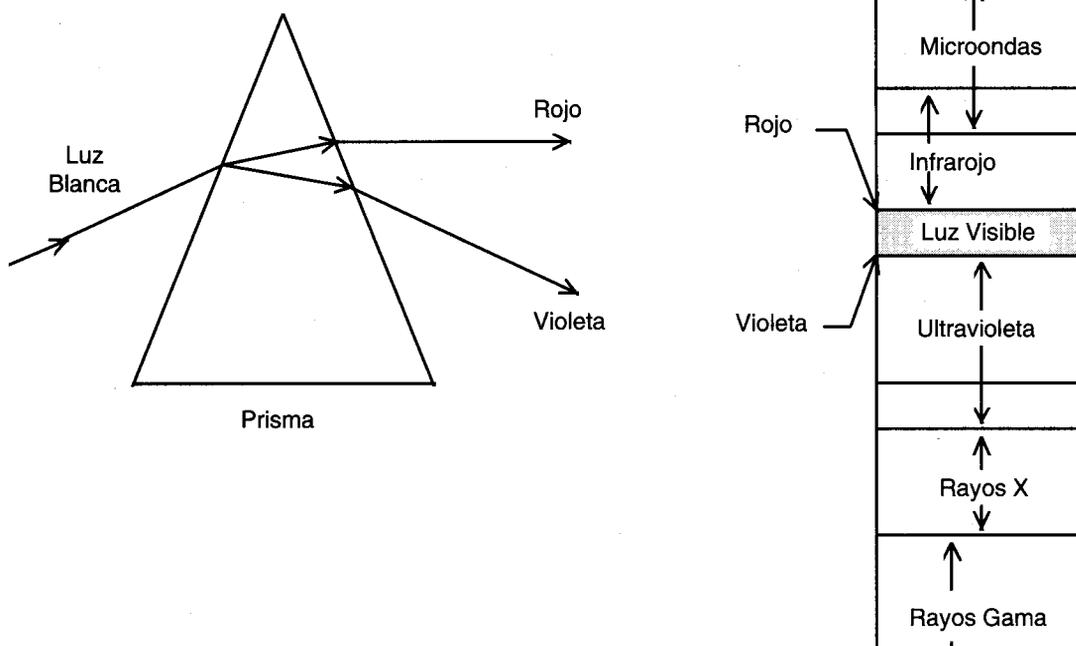


FIGURA 9
Dispersión de la luz en un prisma y espectro electromagnético

todas las ondas elementales que constituyen el rayo láser se hallen en fase, es decir, que las crestas de todas las ondas coincidan entre sí, adoptando un orden regular.

En suma, la interferencia constructiva de todas las ondas emitidas por los átomos es la que tiene por resultado final una onda suficientemente intensa, con una longitud de onda determinada, y en donde las crestas y los valles de la misma son claramente identificables.

1.2.4 Difracción

La difracción es otro fenómeno que desempeña un papel fundamental en la holografía, tan importante como la interferencia: La difracción representa la posibilidad de reconstruir el holograma, es decir, de recuperar la imagen holográfica previamente registrada.

No queremos embarcarnos con un tratamiento riguroso de la difracción, que sin duda nos llevaría a discusiones muy complejas y numerosos acertijos matemáticos. Por el contrario, nos limitaremos a algunos enunciados generales y a citar un par de ejemplos que nos servirán como punto de referencia para lo que sigue.

La difracción es un efecto que conlleva a severas restricciones en el diseño de los sistemas formadores de imágenes (microscopios, telescopios, cámaras fotográficas, etc.), pero también, se constituye en el fenómeno clave para entender el funcionamiento de numerosos instrumentos y dispositivos ópticos, y es el que da lugar a la implementación de diversas técnicas metroológicas y en general, a una amplia gama de aplicaciones de la Óptica. En particular, la difracción de la luz es el fenómeno que permite llevar a cabo la "reconstrucción" de un holograma, es decir, lograr la recuperación de una imagen tridimensional a partir de un registro holográfico previamente realizado.

Para comenzar a apreciar los efectos de la difracción, retomemos el ejemplo de nuestra cámara oscura, e imaginemos que podemos disminuir a voluntad el tamaño del orificio de la misma:

Desprevenidamente uno esperaría que, a causa de la reducción progresiva del tamaño de la abertura, se diera un adelgazamiento paulatino de los

conos de luz al cruzar el orificio, de modo que tales conos se aproximarán cada vez más a nuestra idea intuitiva del rayo de luz. Pero la realidad es otra, dado que, más allá de cierto límite, una disminución mayor de la abertura hace que cada rayo comience a convertirse en una especie de cono de luz, tanto más amplio cuanto menor sea el diámetro de la abertura.

Además, las características de dicho cono luminoso son tan particulares que, contraviniendo de nuevo nuestro sentido común, en el fondo de la caja proyectaría un conjunto de anillos brillantes, dispuestos alrededor de un mismo centro. No se encontraría un círculo con una iluminación relativamente uniforme, ni se presentaría una disminución gradual de la intensidad de la luz, desde el centro hacia los bordes, sino que, luciría como si la luz hubiese llegado únicamente a los lugares localizados a ciertas distancias del centro de la región iluminada. Ver **Figura 10**.

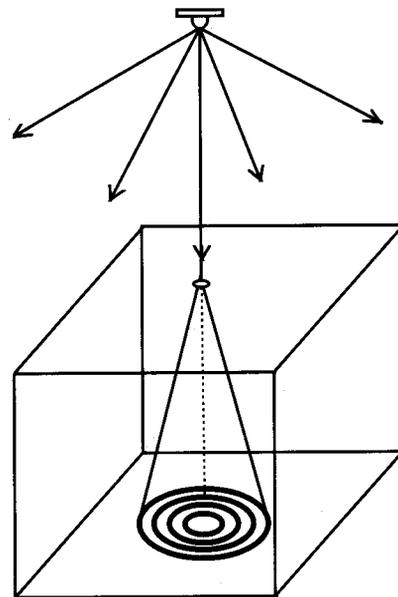


FIGURA 10
Cámara de agujero y cono de difracción

La clave de este asunto se relaciona con el hecho de haber dejado pasar una mínima cantidad de la luz a través del agujero, obstaculizado el paso de la mayor parte de la onda luminosa. En general, la difracción ocurre siempre que el paso de un haz luminoso sea modificado localmente, por ejemplo, colocándose a la onda un obstáculo en su camino o retrasando de algún modo su propagación en determinados lugares.

Adelantando un poco más, este extraño patrón de anillos concéntricos es el resultado final de un fenómeno de interferencia, de la luz que cruza el agujero, en donde las regiones más brillantes corresponden a los lugares en donde la interferencia es constructiva, en tanto que aquellos lugares que parecen no haber sido iluminados evidencian la interferencia destructiva de la luz.

Un caso que merece especial atención es el efecto que produce el paso de la luz a través de un arreglo regular de aberturas u obstáculos, denominado rejilla de difracción: Imaginemos que sobre un trozo de acetato transparente hemos dibujado una serie de líneas paralelas, igualmente espaciadas, como se muestra en la **Figura 11a**).

En la **Figura 11b**) se ilustra la división que experimenta un rayo de luz al cruzar la rejilla, efecto que se hace muy notorio cuando la distancia entre las líneas dibujadas sobre el acetato es muy pequeña.

Debemos anotar que, aunque uno de los rayos difractados sigue propagándose en la dirección original, como si la rejilla no hubiese estado presente, la intensidad de dicho rayo ha disminuido en proporción a la cantidad de luz que (habiéndose desviado) ha dado lugar a los restantes rayos difractados. Pero, dado que la intensidad relativa de los rayos difractados puede modificarse, hasta el punto de lograr que uno de ellos sea muchísimo más intenso que los otros, centraremos nuestra atención únicamente en uno de los rayos difractados, con lo cual simplificaremos notablemente nuestro análisis.

2. LA IDEA BASICA DE LA HOLOGRAFIA

Hemos precisado algunos conceptos relativos a la interferencia y la difracción de la luz, desde un punto de vista muy general y considerando cada

fenómeno con relativa independencia del otro. En el mismo orden de ideas, salvo algunos comentarios aislados, tampoco nos hemos comprometido con una discusión acerca de la relevancia y el modo como se incorporan la interferencia y la difracción en la holografía.

Sin embargo, ahora tenemos los elementos de juicio suficientes para abordar el tema de la aplicación de estos fenómenos en el registro y la reconstrucción de un holograma. Veremos en qué principios físicos se basa la realización de un holograma y la recuperación de la imagen correspondiente, sin involucrarnos con los detalles técnicos y las realizaciones concretas.

Recordemos que el registro o construcción de un holograma antecede lógicamente al proceso de reconstrucción del mismo, en tanto no tendría sentido la recuperación de una imagen que no hubiese sido previamente registrada: El segundo paso complementa y justifica el primero. Similarmente, en la holografía se combina la aplicación de la interferencia y la difracción de la luz, complementándose: En el registro del holograma la interferencia desempeña su papel protagónico, en tanto que la reproducción de la imagen es un efecto de difracción.

Veamos lo que ocurre si la onda de interés se hace interferir con una segunda onda: Sabemos que la interferencia entre las ondas hace que se presenten variaciones muy marcadas de la intensidad de la luz. En la región iluminada por ambas se presentan lugares en donde el brillo de la luz es exagerado, mientras que otros sitios, posiblemente muy próximos, la doble iluminación bien podría pasar inadvertida, como si no hubiese llegado luz hasta allí, o hubiese llegado muy poca. Sin embargo, también sabemos que este curioso comportamiento se debe a que, dependiendo de la

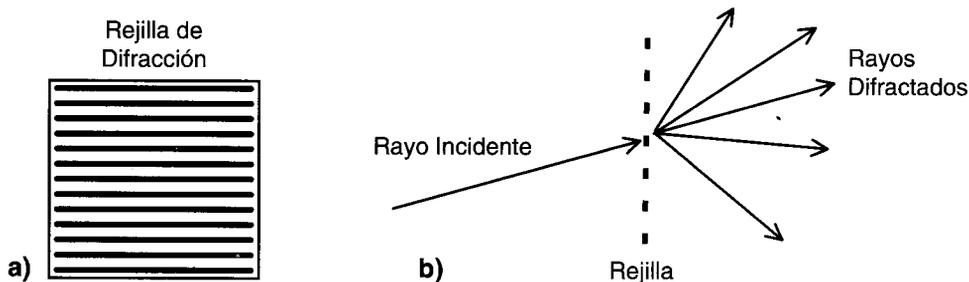


Figura 11
a) Rejilla de difracción y b) Difracción de un rayo

diferencia de fase de las dos ondas, la interferencia entre ellas da lugar a que sus efectos se refuercen o se anulen entre sí, parcial o totalmente. Dicho de otro modo, allí donde la luz alcanza su máxima intensidad, las ondas están en fase e interfieren constructivamente, en tanto que las intensidades mínimas se registran en los lugares más oscuros, que es en donde las ondas se hallan en contrafase e interfieren destructivamente.

La **Figura 12a)** muestra la interferencia de dos ondas, cada una representada mediante un conjunto de arcos (frentes de onda), cuya superposición revela la aparición de franjas brillantes y oscuras. En particular, sobre el plano H se evidencian estos cambios brillante-oscuro, dando por resultado una cierta distribución de franjas sobre dicho plano.

Ahora bien, si la diferencia de fase de las ondas es la propiedad que determina en qué lugares del plano la interferencia es constructiva y en qué lugares es destructiva, entonces, un registro de un arreglo de franjas de esta naturaleza contiene implícitamente la caracterización de las diferencias de fase de las

ondas y en consecuencia, también contiene la información relativa a la fase de la onda de interés.

Un registro de esta índole se llama holograma. Si una de las ondas corresponde a la luz reflejada o transmitida por un objeto dado, el registro de estas franjas de interferencia es un holograma de dicho objeto.

Ahora analizaremos a qué se debe que pueda llevarse a cabo la reconstrucción de una imagen holográfica:

Recordemos que una onda luminosa se difracta cuando se le impide pasar a través de unos lugares específicos, sin que en otros sitios sufra modificación alguna. Desde esta perspectiva, no debe extrañarnos que al iluminar un holograma se produzca un efecto de difracción de la onda iluminadora, teniendo en cuenta que el holograma consiste esencialmente en un registro de cierto arreglo de franjas oscuras que obstaculizan el paso de la luz a través de ellas, como ocurre cuando la luz se difracta en una rejilla de difracción.

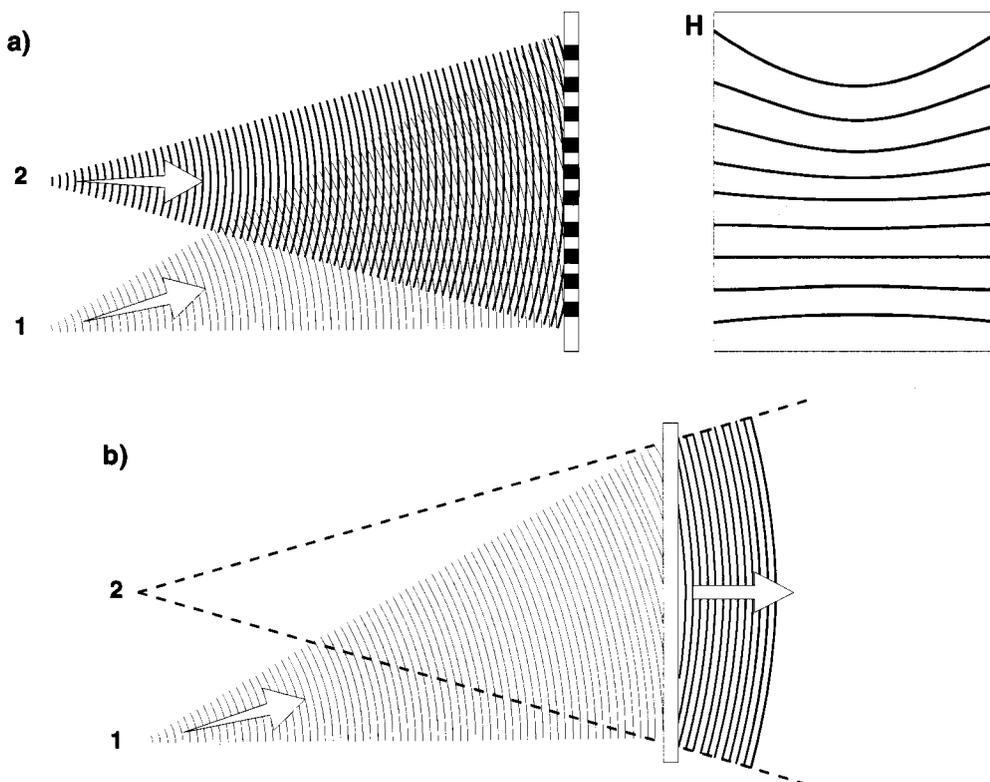


FIGURA 12
 a) Interferencia de dos ondas para el registro de un holograma
 b) Reconstrucción holográfica de una onda

Sin embargo, ocurre un hecho asombroso cuando iluminamos el holograma mediante una de las ondas que previamente ha participado en el registro.

Para simplificar, remitámonos a la **Figura 12b)**. Supongamos que el holograma es el mismo que ha sido registrado antes, mediante la interferencia de las ondas 1 y 2 mostradas en la **Figura 12a)**: Sorprendentemente, al iluminar este registro únicamente con la onda 1, a causa de la difracción que produce su paso a través del holograma, dicha onda se transforma en una onda cuyas características coinciden con las de onda 2. Similarmente, si iluminamos el holograma exclusivamente con la onda 2, obtenemos como resultado la onda 1.

En suma, cuando se ilumina el holograma con una de las ondas que fue utilizada durante el registro, a causa de su difracción, se reconstruye la otra. Ahí está la clave.

BIBLIOGRAFIA

- Colier, Robert J., Christoph, Burckhardt and Laurence, Lin. Optical Holography. New York, Academic Press, 1971.
- Erf, Robert. Holographic Nondestructive Testing. New York, Academic Press, 1974.
- Hariharan, P. Optical Holography "Principles, Techniques and Applications". Cambridge, University Press, 1983.
- Iovine, Jhon. La Holografía. Bogotá, McGraw-Hill, 1991.
- O'Shea, Donald C. Elements Of Modern Optical Design. New York, John Wiley & Sons, 1985.
- Ostrovsky, Yu. I., Shchepinov, V.P. and Yakovlev, V.V. Holographic Interferometry In Experimental Mechanics. Berlin, Springer-Verlag, 1991.
- Saxby, Graham. Holograms. London, Focal Press, 1980.
- Smith, H. M. Principles of Holography. New York, John Wiley & Sons, 1979.
- Unterseher, Fred, Hansen, Jeannene and Schlesinger, Bob. Holography Handbook. "Making Holograms The Easy Way". Berkeley, Roos Books, 1982.

NOTA SOBRE LOS AUTORES

INVESTIGACIONES:

Desde 1987 hemos venido desempeñándonos como investigadores en los siguientes proyectos:

- Hologramas de Segunda Generación, Centro de Investigaciones de la Universidad de Antioquia, 1991.
- Composición y Seudocoloreado en Holografía, Centro de Investigaciones de la Universidad de Antioquia, 1992.
- Técnicas Experimentales en Interferometría Holográfica y Aplicaciones, Universidad EAFIT, 1994.
- Interpretación de Interferogramas Holográficos, Universidad EAFIT, 1995. Actualmente en ejecución.