

HOLOGRAFÍA

Imágenes tridimensionales

MANUEL FERNÁNDEZ G.*

INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo pasado, a través del proceso fotográfico ha sido posible grabar y retener de manera permanente diversas imágenes. La combinación adecuada de lentes y emulsión fotográfica hicieron posible los mapas de estrellas, planetas y galaxias, el registro de espectros ópticos, el almacenamiento de grandes cantidades de datos en la forma de pequeñas imágenes grabadas y muchas otras aplicaciones. El proceso fotográfico se describe en términos de refracción (parte real) donde las lentes de la cámara desvían la luz y forman la imagen en la película fotosensible. Una vez revelada la película por un método químico, la imagen se observa debido a la modulación de la parte imaginaria del índice de refracción, esto es, la mayor o menor absorción de la luz empleada para observar la fotografía ya sea en papel o en transparencia. La limitante, sin embargo, es que se produce una imagen en dos dimensiones, es decir, sin profundidad.

Para superar este problema se han desarrollado cámaras de doble lente que producen pares de fotografías que al ser observadas con un visor producen una imagen estereoscópica. Estas imágenes tienen profundidad, aunque sólo muestran el objeto fotografiado desde dos puntos de vista.

El proceso holográfico es un nuevo método para formar imágenes ópticas que permite grabar y retener imágenes en tres dimensiones. El desarrollo inicial se debe a Dennis Gabor del Imperial College of Science and Technology [Gabor (1948)], quien tratando de mejorar el poder de resolución del microscopio electrónico, propuso grabar, además de la información de amplitud de la onda luminosa, la información de fase a través de la superposición de una onda proveniente del objeto con una onda de referencia monocromática. El descubrimiento estuvo "congelado" debido a la falta de una fuente adecuada de luz monocromática intensa. Hoy en día, el láser ha satisfecho esta necesidad [Leith y Upatnieks (1963) y (1964)].

OBTENCIÓN DE UN HOLOGRAMA

Para hacer un holograma se comienza con un haz de luz laser, parte del cual es dirigido directamente hacia el medio de grabado, que usualmente es una emulsión fotográfica de muy alta



resolución (película holográfica); a este haz " E_r " que incide directamente sobre el medio de grabado se le llama "haz de referencia"; la otra parte del haz ilumina al objeto que dispersa e incide también sobre la película, este haz dispersado " E_o " constituye el "haz del objeto". Un arreglo típico se muestra en la figura 1. Puesto que ambas ondas (referencia y objeto) provienen de la misma fuente, forman un patrón de interferencia estable en el medio de grabado. Este patrón, en general, es un sistema bastante complicado de franjas; el grabado permanente de este patrón de interferencia es llamado holograma (de las palabras griegas "holos" que significa completo y "grafos" que significa grabado).

La película holográfica, responde a la intensidad de la luz EE^* , de manera que una vez expuesta al patrón de interferencia, se revela usando soluciones químicas en un proceso análogo al de cualquier película fotográfica. El resultado final sobre la película es algo irreconocible que no se parece a ninguna imagen particular.

* Laboratorio de Óptica Cuántica. Departamento de Física. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

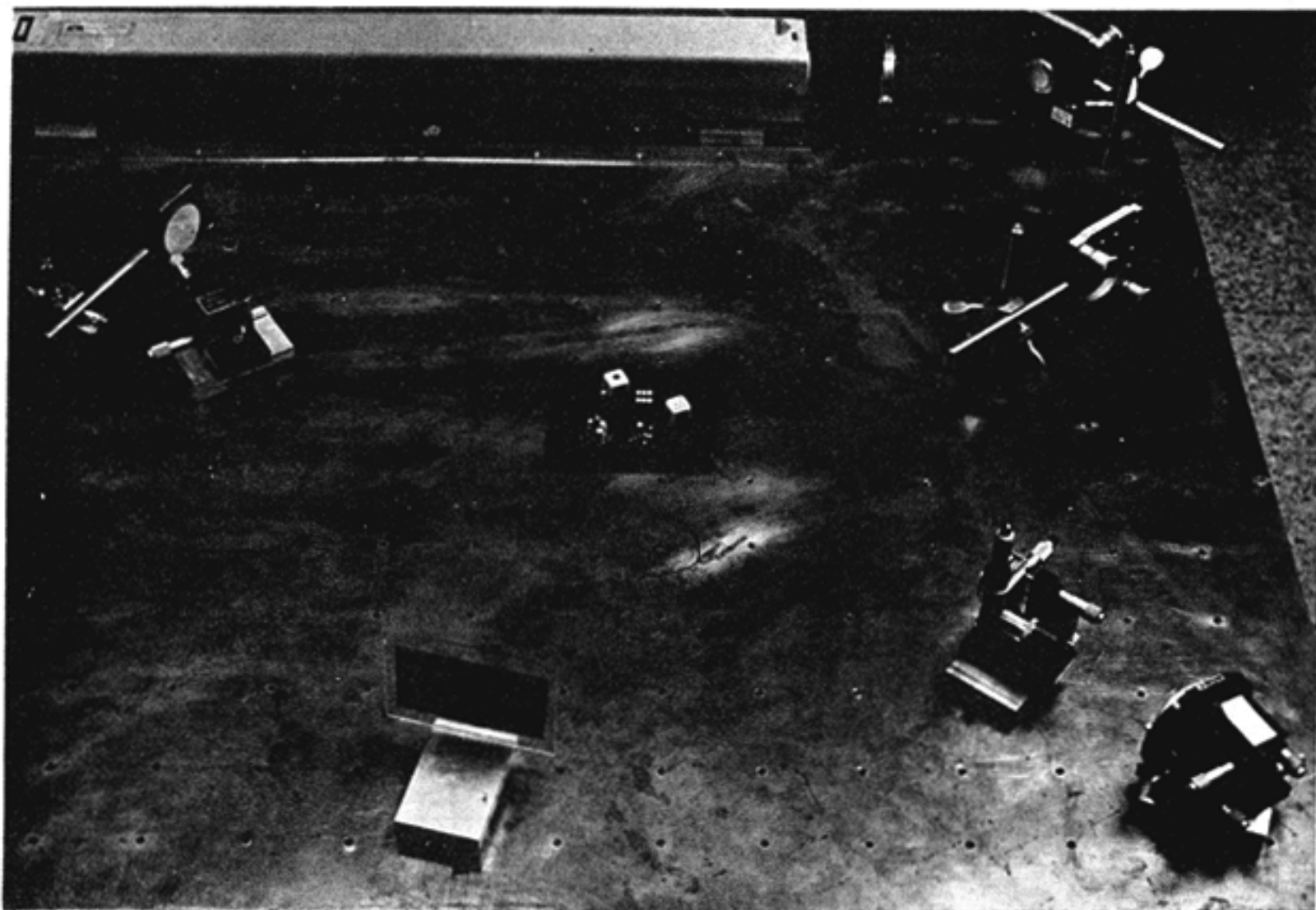


FIGURA 1. Montaje Holográfico. En la parte superior se encuentra un laser de He-Ne cuya emisión pasa por un obturador y subsecuente-mente se desvía por un espejo 100 por ciento reflejante (parte superior derecha), posteriormente se divide el haz en dos por un espejo semitransparente y cada uno de estos haces se refleja en un espejo y se expande por medio de un filtro espacial. Uno de ellos, denominado de referencia, ilumina directamente la película holográfica (parte inferior izquierda) y el otro, denominado de objeto, ilumina al sujeto, en este caso unos dados.

RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN

Cuando el holograma es iluminado con un haz de luz similar al haz de referencia, debido al patrón de interferencia ahí grabado, la onda transmitida se dividirá en dos componentes, una de las cuales se difracta de manera tal, que reproduce exactamente a la onda del objeto original. Esto significa que la imagen del objeto y la imagen reconstruida por el holograma son idénticas, a tal punto que uno no puede diferenciar al objeto de la imagen reconstruida por el holograma. La holografía es entonces un proceso de dos pasos: en el primer paso se graba un patrón de interferencia, obteniéndose el holograma; en el segundo paso el holograma es iluminado con el haz de referencia de tal manera que parte de la luz difractada es una replica exacta de la onda-objeto original.

Si un objeto tridimensional ha sido usado como modelo para grabar el holograma, la imagen reconstruida será tridimensional y exhibirá propiedades de paralaje, de manera que el observador mirará a través del holograma tal y como si mirara al objeto a través de una ventana. En las figuras 2 y 3 ilustramos esta propiedad mostrando dos fotografías del mismo holograma pero desde distintos puntos de vista.

TIPOS DE HOLOGRAMAS RECONSTRUIDOS CON LUZ LÁSER

Existen distintos tipos de hologramas [Collier et al. (1975)], los

cuales pueden clasificarse considerando alguna de las condiciones siguientes: a) por la forma en que el holograma difracta la onda de reconstrucción, b) dependiendo del tipo de luz utilizada en el proceso de reconstrucción.

En el primer caso se pueden distinguir fundamentalmente tres tipos de hologramas. Cuando el patrón de interferencia en la emulsión holográfica consiste en franjas claras y oscuras, el

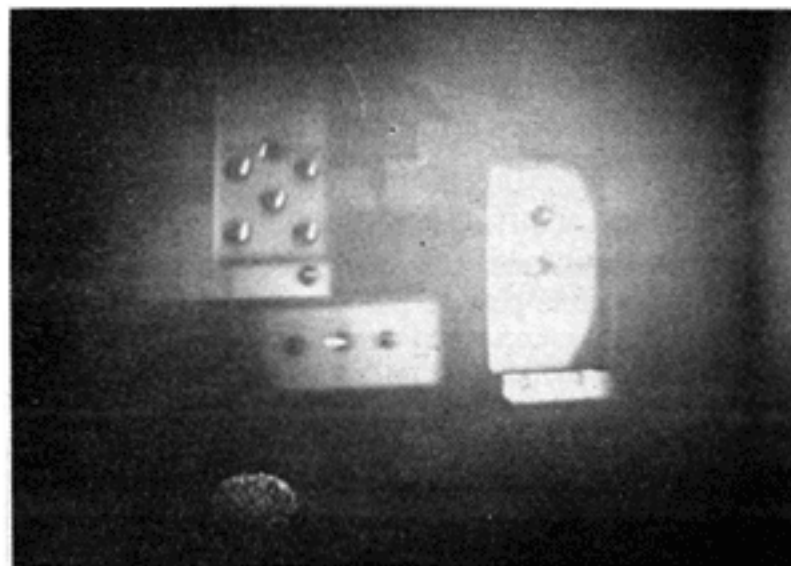
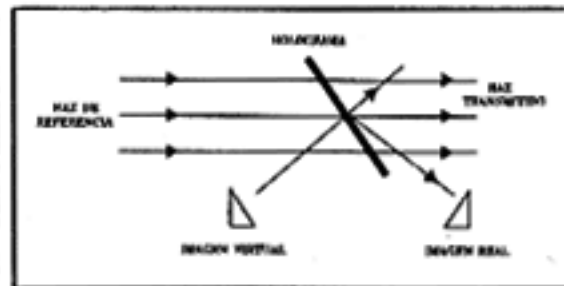


FIGURA 2. Fotografía de un holograma de dominós, donde algunas fichas están parcialmente ocultas.

Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro (por ejemplo del aire al agua) sufre un cambio en su dirección de propagación, este fenómeno es conocido como refracción. Se puede mostrar mediante un experimento sencillo: póngase una moneda en el fondo de un recipiente con paredes opacas y obsérvese desde un ángulo en que no se pueda ver la moneda. Enseguida llénese el recipiente con agua; cuando ésta llega a una cierta altura se podrá ver que la moneda se encuentra en el fondo gracias a la desviación de los rayos de luz.



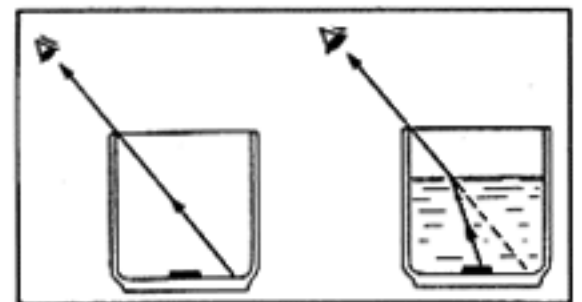
La refracción de la luz es la base de la formación de imágenes en instrumentos construidos con lentes, como sucede en cámaras fotográficas, muchos telescopios y microscopios, lupas, etcétera. Los rayos de luz que emanan de un punto del objeto hacia el aparato óptico son desviados de su trayectoria inicial por el (los) lente (s) y todos ellos alcanzan, al final, un mismo punto que es la imagen del punto original.

La cantidad que relaciona el ángulo de incidencia con el de refracción cuando un rayo atraviesa la superficie de separación entre dos medios, es el índice relativo de refracción y se trata de una cantidad real. La luz es un fenómeno ondulatorio y por lo tanto puede ser tratada matemáticamente como la parte real de funciones complejas periódicas; los campos eléctricos y magnéticos se describen como funciones periódicas de la forma: $E(r)\exp(i\omega t)$ y $H(r)\exp(i\omega t)$, donde $\exp(i\omega t) = \cos\omega t + i\sin\omega t$. La introducción del método de amplitudes complejas en el estudio de la luz trae consigo la definición de un índice de refracción complejo, siendo la parte real la que usualmente conocemos. La parte imaginaria caracteriza a la absorción de la luz por el medio donde se propaga.

Otro fenómeno que interviene en la formación de imágenes es la interferencia. Cuando dos ondas de la misma amplitud se encuentran en el mismo punto puede suceder que el resultado sea la anulación de ambas (interferencia destructiva), la suma algebraica de las amplitudes (una de doble amplitud) o todos los casos intermedios posibles. La interferencia tanto destructiva como constructiva se puede observar con un arreglo de orificios hechos sobre un material opaco. Si se hace incidir luz sobre dicho objeto y se pone una pantalla

del otro lado, observaremos en esta última la formación de franjas de máxima intensidad separadas entre sí por franjas oscuras.

La elaboración de un holograma se basa en este principio. Un haz de luz llega directamente a la placa fotográfica y otro proviene del objeto. La interferencia de ambos se graba en la película, formando un patrón de zonas claras y oscuras. En un negativo los máximos de intensidad de luz corresponden a las zonas oscuras y viceversa. La reconstrucción de la imagen se hace con un haz similar al "haz del objeto". La luz que pasa a través de la placa holográfica se divide en 3 partes que son: el haz de referencia transmitido directamente a través de la placa fotográfica, una imagen real del objeto y una imagen virtual del mismo. Lo interesante es que podemos observar la imagen holográfica desde distintos ángulos y esto da diferentes perspectivas como sucede si observáramos el objeto en sí.



haz de reconstrucción se difracta en las zonas claras y se absorbe en las oscuras; este tipo de holograma se conoce como holograma de absorción, y en este caso el patrón de interferencia se obtiene modulando la parte imaginaria del índice de refracción de la emulsión, es decir, modificando su coeficiente de absorción localmente. La eficiencia de difracción en este tipo de hologramas es del orden del 6 por ciento, es decir, que sólo una pequeña fracción de la luz de iluminación forma la imagen.

Para aumentar la intensidad de la imagen es posible grabar el patrón de difracción modulando la parte real del índice de refracción en la emulsión holográfica y obtener un holograma denominado de fase; en este caso la luz de reconstrucción se difracta y refracta pero no se absorbe, logrando así una mejor eficiencia de difracción que puede ser cercana al 100 por ciento [Chang y Winik (1980)]. Para obtener un holograma de fase se hace un holograma de absorción y posteriormente se blanquea; el blanqueado consiste en reemplazar la plata en la emulsión revelada por partículas de alguna sal de plata, las cuales tienen un índice de refracción diferente a la gelatina que los alberga y muy poca absorción en el rango visible, de tal manera que en el proceso de reconstrucción la fase de la onda incidente es modificada como consecuencia de las variaciones locales del índice de refracción en el holograma.

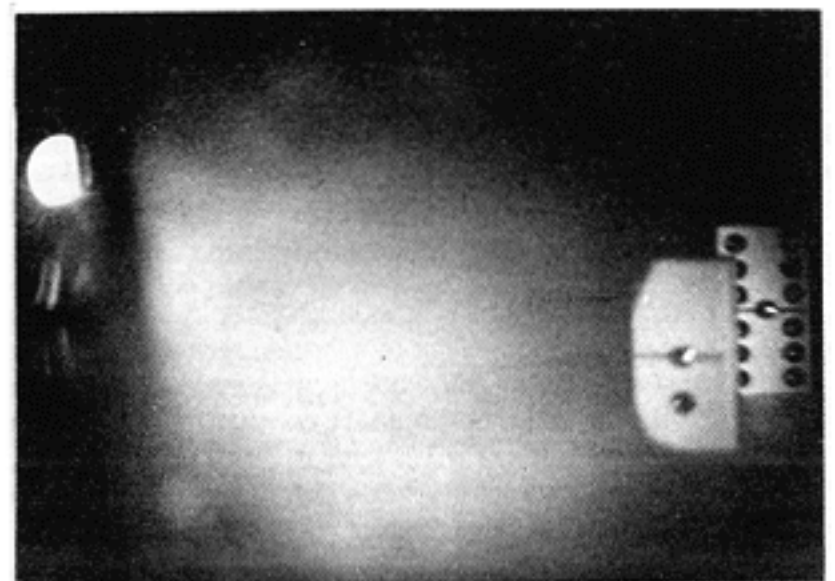
El camino óptico que recorre el haz de reconstrucción es igual al espesor de la película por la parte real del índice de refracción. Hemos mencionado que es posible variar el camino óptico modulando el índice de refracción, sin embargo, es posible también mantener el índice de refracción constante y variar el espesor de la película; este tipo de hologramas se conocen como hologramas de relieve. Para obtenerlos es posible modificar químicamente a un holograma de absorción removiendo las zonas oscuras de la emulsión y dejando las claras, obteniendo así variaciones de espesor de la emulsión [Rogers (1952) y McGrew (1980)]. Se puede utilizar este tipo de holograma co-

mo un "molde" para copiado en plástico y la consecuente producción en serie de hologramas de manera análoga al copiado de discos fonográficos.

HOLOGRAMAS DE LUZ BLANCA

Ahora bien, un holograma se puede observar con un haz de reconstrucción igual al que se utilizó como haz de referencia, que necesariamente es de luz laser. Debido a la desventaja que

FIGURA 3. Fotografía del mismo holograma de la figura 2, pero desde otro punto de vista; una ficha previamente oculta se puede observar claramente.



implica el requerir un laser para observar la imagen holográfica, se estudió la posibilidad de observar un holograma con una fuente de luz convencional, ya sea el sol o un foco de luz incandescente. Se han encontrado, hasta ahora, dos maneras de observar hologramas sin necesidad de un laser, estos se conocen como hologramas de luz blanca. Debido a que el principal requerimiento en la reconstrucción es iluminar con luz monocromática (laser), si iluminamos con luz convencional policromática, es posible incluir un elemento óptico que seleccione el color de la luz incidente en el holograma y utilice así una fracción de la luz que sea cuasimonocromática.

Un elemento óptico de esta naturaleza es una rejilla de difracción, pues ésta separa espacialmente los diferentes colores de la luz. Utilizando esta idea se han sobrepuesto rejillas de difracción y hologramas, produciendo un tipo de holograma denominado de arcoiris, el cual tiene la ventaja de poder ser observado con luz convencional [Benton (1963)]. Obviamente, dependiendo del ángulo de observación, el holograma se aprecia en distintos colores y de ahí su nombre de arcoiris. La desventaja de estos hologramas es que se obtiene paralaje y consecuentemente tercera dimensión solamente en una dirección más no en la otra, ya que se está utilizando una de las direcciones para separar los distintos colores. La información en este tipo de holograma puede pasarse a relieve y ser entonces susceptible de copiado. Este tipo de hologramas son los que se utilizan en las portadas de revistas, tarjetas de crédito, relojes, etc.

La otra manera de producir hologramas de luz blanca es utilizando filtros interferenciales que seleccionen las frecuencias adecuadas de la luz incidente [Denisyuk (1963)]. Esto se logra utilizando emulsiones holográficas gruesas (de 8 a 15 micras de espesor), en donde la información se graba en distintos planos que se conocen como planos de Bragg. En este caso, la imagen es tridimensional en todas direcciones, aunque no es posible trasladar la información a un holograma de relieve, pues esta se encuentra en un volumen y no en un plano como en los casos anteriores.



Dennis Gabor, inventor de la técnica holográfica en 1948

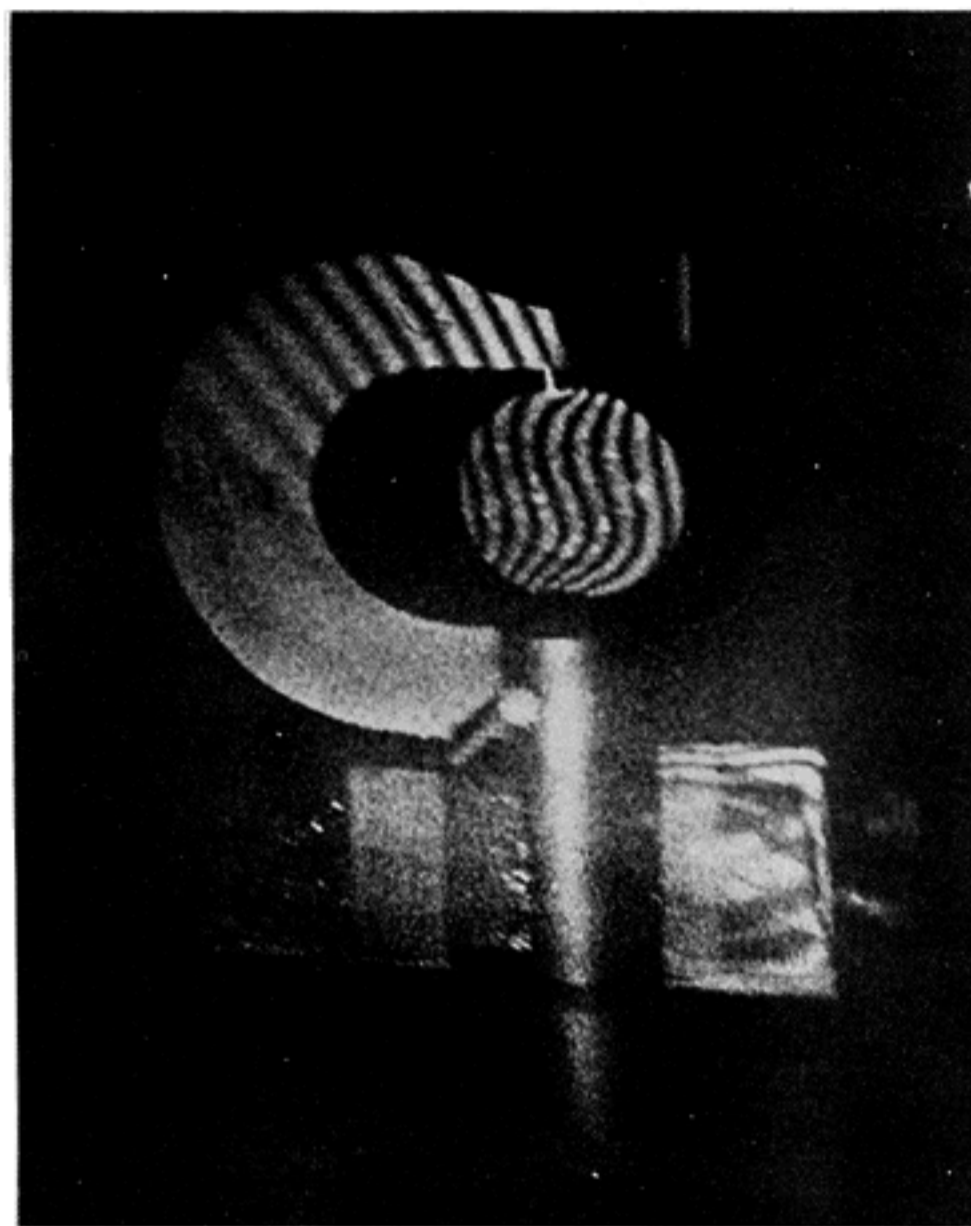


FIGURA 4. Fotografía de un interferograma holográfico donde se observan las figuras de interferencia de un micrómetro debidas a una deformación mecánica.

APLICACIONES DE LA HOLOGRAFÍA

Existen muchas aplicaciones de la holografía, como son la interferencia holográfica, la obtención de rejillas de difracción por métodos holográficos, pruebas no destructivas de sistemas ópticos, procesamiento de imágenes, imágenes tridimensionales para museografía, etc. A manera de ejemplo, consideremos las posibilidades de la interferometría holográfica. Esta técnica consiste en exponer un holograma dos veces, primero del objeto sin deformar y posteriormente sujeto a una pequeña deformación, ya sea por un esfuerzo mecánico o por un cambio en la temperatura. La superposición de las dos imágenes ligeramente distintas produce franjas de interferencia que muestran deformacio-

INSTITUCIONES QUE REALIZAN INVESTIGACIÓN SOBRE HOLOGRAFÍA

- CICESE. "Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada". Av. Ruíz y 17va # 1703, Ensenada, B.C.,
- CIO. "Centro de Investigación en Óptica" A.P. 948, 37000, León, Gto.
- INAOE. "Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica" A.P. 51 y 216, Tonanzintla, Pue.
- UAM-I. "Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa", Av. Michoacán y Purísima s/n, Iztapalapa, 09340, Ap. Post. 55-532, D.F.