

# Holografía, Ciencia y Arte\*

Manuel Quintanilla Montón

Departamento de Física Aplicada

Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza

## 1 Introducción

Deseo comenzar mi disertación agradeciendo profundamente, al Sr. Decano de la Facultad de Ciencias y a su equipo de gobierno, al haberme invitado a participar en este solemne acto. Celebramos la festividad de nuestro patrono San Alberto Magno. Con ese motivo honremos a los profesores que se jubilan. Honores a los estudiantes y graduados premiados. Ánimos a los estudiantes que se incorporan a nuestra Facultad. Sé que ha sido la incorporación, por vez primera, de los alumnos de Óptica y Optometría lo que ha propiciado mi elección para esta disertación, bienvenidos todos.

Muchas gracias Señor Rector por el decidido apoyo que ha otorgado a la implantación de los estudios en Óptica y Optometría

Un patrono como San Alberto enorgullece y anima con su ejemplo, escribió sobre casi todas las Ciencias Naturales, incluso sobre óptica. Realizó una experiencia sobre dispersión cromática, descrita de la siguiente forma: “Si en un interior tomamos un cristal de roca y lo sostenemos ante nosotros de modo que esté en parte a la luz del sol y en parte a la sombra, lanzará sobre la pared un bello arco iris”<sup>1</sup>.

Otra observación tiene que ver con la propagación rectilínea de la luz, es una argumentación sobre la esfericidad de la Tierra, dice: “La sombra siempre redondeada que la Tierra proyecta sobre la luna sólo se puede explicar por su figura esférica”. Está claro que en sus más de setenta libros y tratados hay una gran aportación a las ciencias naturales, dejó constancia de su curiosidad científica, contrastando con experiencias propias el saber transmitido, lo que da testimonio de su afán investigador.

---

\*Conferencia leída en el Paraninfo de la Universidad de Zaragoza, el 14 de noviembre de 2005, con motivo de la festividad de San Alberto Magno.

<sup>1</sup>Brigit Steib y Roland Popp. “Alberto Magno, el gran curioso” Investigación y Ciencia, 68-75, junio. 2004.

Son muchos los gratos recuerdos que asocio a este edificio. Aquí empecé, hace ahora cincuenta y un años, mis estudios de Física. Disfruté del magisterio de mis Profesores y de la amistad de mis compañeros. Un recuerdo especial para mi maestro el Profesor Justiniano Casas, que se incorporó a nuestra Facultad en el mismo año que yo comencé, trajo nuevas formas de ser y estar en la Universidad y nos animó a desarrollar la investigación. Recuerdo a mis compañeros Profesores Lacasta, Moneo, Javier Goñi y José M<sup>a</sup> Savirón, con quienes comencé la tarea de investigación, y a quienes guardo una gran admiración y cariño.

## 2 HOLOGRAFÍA, CIENCIA Y ARTE

En julio de 1970 asistí al Symposium Internacional sobre Aplicaciones de la Holografía en Besançon (Francia), participaron más de cuatrocientos investigadores de todo el mundo con aplicaciones muy diversas e interesantes. Al año siguiente, en diciembre de 1971, Dennis Gabor recibía el premio Nobel de Física “por la invención y desarrollo del método holográfico”.

La observación de una escena reproducida de un holograma causa asombro y admiración, tanto por la exacta reproducción tridimensional como por la bella reproducción cromática. Se hacen retratos holográficos de personas, se hizo uno del profesor Dennis Gabor y son muchos los personajes famosos que han querido ser registrados por este método.

Hay curiosidad por conocer los fundamentos y aplicaciones de esta técnica, no es inusual la pregunta ¿y esto cómo se hace?. Pretendo responder en esta disertación.

## 3 MOTIVACIÓN PARA INVENTAR LA HOLOGRAFÍA

En 1947 Gabor estaba muy interesado en la microscopía electrónica, que había mejorado en cien veces el poder resolutivo de los mejores microscopios con luz y se había llegado muy cerca de resolver las estructuras atómicas. La longitud de onda de Louis de Broglie asociada a los electrones rápidos, alrededor de una décima de Angstrom, era suficientemente corta, pero la óptica no lo suficientemente perfecta.

El límite teórico, en aquel tiempo, se estimaba en  $4 \text{ \AA}$  justo el doble del necesario para resolver las estructuras atómicas, mientras que el límite práctico lo era de  $12 \text{ \AA}$ .

Ante este problema, inherente a las características de los objetivos del microscopio electrónico, tuvo la idea de soslayar la dificultad, de la siguiente forma: ¿por qué no tomar una mala imagen electrónica, pero una que contenga la información “total”, reconstruir la onda y corregirla por métodos ópticos?.

Conocía que la información “total” sólo la podía obtener con haces de electrones coherentes y no mediante la toma de una exposición simple, sino añadiendo un fondo coherente. La interferencia de la onda objeto y el fondo coherente u “onda de referencia” produciría franjas de interferencia, serán máximos donde las fases de ambas ondas coincidan y mínimos donde estén en contrafase. Si se hace un registro positivo, de modo que sólo transmita en los máximos, cuando el registro se ilumine con una onda como la de referencia, onda de reconstrucción, en esos lugares se tendrán máximos como cuando estaban superpuestas las dos ondas. Si nos atenemos al principio de Huygens, detrás aparecerán dos ondas como si la distribución de intensidad proviniese de la superposición de ambas, tendremos reconstruida la onda objeto.

El proceso propuesto sería de dos-etapas: la primera, con el microscopio electrónico, para producir la figura interferencial entre el haz objeto y el fondo coherente, es decir, la parte no difractada del haz de iluminación. Al interferograma así obtenido lo llamó “Holograma”, de la palabra griega “holos”, el todo, ya que contiene la información total (la amplitud y la fase). En la segunda etapa, utilizando luz, reconstruiría el frente de onda y lo corregiría para obtener una buena imagen.

### 3.1 *Fundamentos*

Los fundamentos se encuentran en la naturaleza ondulatoria de la luz, que fue demostrada por Thomas Young con uno de los experimentos más bellos de la Física. Cuando se superponen las ondas provenientes de dos fuentes puntuales, iluminadas con la luz de una llama que contiene pequeñas cantidades de sal común, sobre una pantalla colocada paralela a la línea de unión de los dos orificios, se producen franjas claras y oscuras regularmente espaciadas. Este es el primer experimento en el que se demuestra que la superposición de luz puede producir oscuridad. A este fenómeno es lo que llamamos interferencias.

Con este experimento se corroboraban las ideas intuitivas de Christian Huygens respecto al carácter ondulatorio de la luz. Proponía que la luz monocromática presentaba oscilaciones regulares sinusoidales que se propagaban en el medio, necesariamente sólido e intangible, que constituía el ether.

Para que se produzcan interferencias la luz tiene que ser coherente, es decir, muy monocromática, ello permite que en los experimentos interferenciales aparezcan muchas franjas de interferencia. Coherencia es una medida adecuada de la diferencia de camino, entre dos rayos de la misma fuente, para que se puedan producir interferencias con un contraste apreciable. A esta propiedad se le llama longitud de coherencia y fue Albert Michelson quien entendió que era una medida recíproca de la anchura espectral de una raya de emisión.

La idea de utilizar el fondo coherente de luz transmitida, aparece en el trabajo de Frits Zernike sobre “el microscopio de contraste de fase”. Mostrando como podía utilizar, para objetos de fase débilmente absorbentes, el fondo coherente e invertir su fase en  $\lambda/2$  antes de añadirla a la luz difundida. Esta idea permite ver muestras de seres microscopicos en todos sus detalles sin necesidad de pigmentarlos.

El experimento que realizó Gabor con luz no fue fácil, el mejor compromiso entre coherencia e intensidad lo encontró en las lámparas de alta presión de mercurio, que presentaba para la raya verde una longitud de coherencia de sólo 0,1 mm. suficiente para producir 200 franjas. La coherencia espacial suficiente la obtenía iluminando un orificio de 3 micras de diámetro. En estas condiciones tenía luz suficiente para hacer hologramas de objetos de alrededor de 1 cm. de diámetro, con exposiciones de algunos minutos, en las emulsiones fotográficas más sensibles de que disponía.

La baja longitud de coherencia le obligó a realizar un montaje en línea. La reconstrucción no resultó perfecta y ello estaba causado por el registro cuadrático en amplitud. Cada punto objeto junto al fondo coherente produce una figura interferencial en forma de zonas circulares de Fresnel. Lo que se conoce como lentes de Soret. Una tal lente posee dos focales una positiva y otra negativa, por lo que en el proceso de reconstrucción aparecen dos imágenes en línea “imágenes gemelas” que sólo se separan por enfoque y esta separación nunca es perfecta. El primer holograma resulta un homenaje a Huygens, Young y Fresnel, utilizó estos nombres como objeto. Después de estos trabajos y algunos otros prácticamente se paró la investigación en el tema.

### 3.2 *El láser un revulsivo*

La holografía se reactivó de forma explosiva en 1963, con la publicación sobre el primer holograma realizado con luz láser por Emmet N. Leith y Juris Upatnieks, quienes habían trabajado en el “radar de observación lateral”.

La técnica del “radar de observación lateral” es holográfica, se realiza con ondas electromagnéticas, longitud de onda 100.000 veces mayor que las de la luz. En el proceso de registro se ilumina el terreno con el haz radar desde un avión que lleva velocidad uniforme, la señal de vuelta se recoge y mezcla con un oscilador local con lo que registra información de la amplitud y fase.

Con esta señal demodulada se emplea por un procedimiento original, para modular la intensidad del haz de barrido de un tubo de rayos catódicos. Esta señal luminosa se emplea para generar un holograma sobre una película que se desplaza horizontalmente. El proceso de reconstrucción se hace con luz y utiliza óptica anamorfica adecuada para producir imágenes del terreno con resolución mejor que un metro. Se utiliza en cartografía de alta precisión.

Con la luz láser Leith y Upatnieks propusieron la técnica de “haz de referencia inclinado”, con el que soslayaron el problema de la doble imagen y ello gracias a la alta coherencia longitudinal, un factor del orden de miles de veces respecto a la luz de la lámpara de mercurio. Pudieron separar el haz de referencia del haz de iluminación. El resultado fue que las dos imágenes reconstruidas no sólo estaban separadas en profundidad, sino también angularmente por dos veces el ángulo del haz de referencia. También la intensidad de la luz láser excedía a la de la lámpara de mercurio en varios cientos de miles de veces. Con ello se conseguía iluminar objetos mayores, utilizar emulsiones de grano más fino y emplear tiempos de exposición muy cortos que reducen los problemas de estabilidad durante el registro.

Con esta técnica, utilizando ondas de referencia de diferente inclinación y procesos de blanqueo de las emulsiones, se consiguen registrar varias escenas sobre la misma placa y reproducir las escenas sin mezcla alguna con las otras. A esta propiedad se la llama selectividad angular y es la base de las memorias ópticas holográficas.

Otra propiedad fue la del registro con lasers pulsantes, pulsos del orden del nanosegundos, lo que permite registrar eventos ultrarrápidos y reproducir estas imágenes tridimensionales congeladas en el proceso de registro. Es la utilización de lasers pulsantes la que permite el registro de hologramas retratos, pues la alteración de la escena a registrar es prácticamente nula durante el tiempo de duración del pulso.

### *3.3 Interferometría holográfica*

Una aplicación menos espectacular, pero científicamente más interesante, ha sido la interferometría-holográfica que permite obtener información a escala interferencial óptica de deformaciones de objetos que no presentan calidad óptica. Mediante estas técnicas se pueden visualizar las deformaciones correspondientes a los modos de vibración de instrumentos musicales o de complicadas estructuras.

El primer resultado positivo de la holografía con electrones se producía en 1979, aparecía publicado un trabajo de Endo, Matsuda y Tonomura en el que aplicaban la interferometría holográfica, y la técnica de amplificación de diferencias de fase, para medir espesores de partículas de berilio de hologramas tomados con un microscopio electrónico.

Mientras la interferometría holográfica permite la detección de muy pequeñas deformaciones, del orden de una décima de longitud de onda (unas 50  $m$ ). Esta técnica es demasiado fina para el estudio de piezas de trabajo mecánico. Otra técnica “la de generación de líneas de nivel es más apropiada y produce franjas con diferencias en posición de 25  $m$ . Se puede realizar, utilizando para el registro dos longitudes de onda muy próximas, o modificando ligeramente el índice de refracción del medio ambiente, variando la densidad por aumento de presión, entre dos exposiciones consecutivas.

### 3.4 Holografía arte

Frente a las aplicaciones técnicas, en 1962 aparece otra importante aplicación de la holografía, en ese año el físico soviético Yu N. Denisyuk publicó un trabajo en el que unía las técnicas holográficas con el original método de fotografía en color de Gabriel Lippmann (Premio Nobel 1908). La técnica de Lippman consistía en proyectar la imagen creada por el objetivo fotográfico sobre una emulsión de grano muy fino a la que había adosado una superficie de mercurio como espejo. La luz reflejada en el espejo junto a la incidente producía ondas estacionarias. Los granos de plata se precipitaban en los máximos de intensidad y se formaban superficies separadas aproximadamente la mitad de la longitud de onda. Después de reveladas, al iluminar con luz blanca, las complejas superficies reflejaban sólo luz en una banda estrecha alrededor del color original, ya que sólo para este color las ondas difundidas en las superficies de Lippman se añaden en fase.

Quiero indicar que esta técnica fotográfica la practicó y desarrolló, con gran éxito, el gran científico y Premio Nobel Santiago Ramón y Cajal. Queda recogido en el capítulo Método Interferencial de su libro “Fotografía de los colores”, editado en Madrid en 1912. Hace un análisis claro del fundamento y un trabajo experimental concienzudo sobre las láminas de Zenker, que observa al microscopio (lo que hemos llamado superficies de Lippman). Este estudio le lleva a indicar que, una buena emulsión, debe inscribir por lo menos de seis a ocho ondas estacionarias, para reproducir bien los colores. Fabricó sus propias placas, en su libro da consejos y el método utilizado para obtener placas de espesor uniforme y buena sensibilidad.

Después de este inciso, sigamos con la holografía de Denisyuk. La onda objeto y la referencia inciden por las caras opuestas de la emulsión, las superficies de Lippmann se producen, pero ahora son bisectoras del ángulo formado por los dos frentes de onda. Si ahora, como indica Denisyuk, la emulsión revelada es iluminada por la onda de reconstrucción de luz blanca, el objeto aparece en posición original y del mismo color (siempre que no haya contracción de la gelatina).

Esta técnica, utilizando tres lasers con longitudes de onda en las zonas de los tres primarios, ha permitido el registro y reconstrucción de imágenes de objetos de arte con una calidad impensada. La técnica de Denisyuk se utiliza para sustituir a los objetos originales por hologramas en exposiciones itinerantes. La fidelidad en la reproducción de formas, colores y brillos es tan espectacular que, difícilmente puede decidirse si lo que se ve es el objeto mismo, detrás de una ventana de vidrio, o una reproducción holográfica.

El Museo de Holografía de París contiene colecciones de una riqueza y diversidad únicas, contiene hologramas gigantes, visibles tanto con luz blanca como con luz láser y una importante colección de representaciones holográficas del Museo del Hermitage y del

### 3.5 *Memorias Ópticas*

La posibilidad de utilizar el registro holográfico para almacenar información óptica ha ganado en los últimos años. La selectividad angular, que aumenta con el espesor del medio de registro, permite almacenar la información de varias páginas de datos en un solo holograma. Esta multiplexación se realiza cambiando el ángulo del haz de referencia en cada toma. La lectura se realiza cambiando la dirección del haz de reconstrucción, de esta manera se han registrado y leído, sin intromisión de datos, unas 10.000 páginas en un cristal de Niobato de Litio de seis milímetros de espesor. La fabricación de moduladores espaciales de luz, utilizando las propiedades de las pantallas de cristal líquido, para la presentación de datos binarios de 1024x1024 pixel, y la consecución de matrices de detectores para la lectura del mismo número de pixel, ha relanzado la experimentación en estas técnicas.

En 1995 la compañía Holoplex anunció la aplicación de un aparato, con memoria holográfica, para la identificación de huellas digitales. Los hologramas se registraron en un medio polimérico y el conjunto de hasta cien huellas digitales, podían compararse ópticamente en un segundo. Este dispositivo se ha empleado como llave de entrada en instalaciones de alta seguridad.

El que esta tecnología pueda aplicarse a las memorias de las computadoras, depende de los materiales de registro. Tienen que poseer: gran capacidad de almacenamiento, alta sensibilidad acompañada de tiempos de lectura y grabado muy bajos, baja volatilidad (es deseable años), amplio rango dinámico, reversibilidad, estar libres de deformaciones en el proceso de formación y muy baja relación de error.

Se ha investigado en un amplio número de medios de registro. Uno de los materiales que ha dado una alta productividad de investigación lo constituyen los cristales fotorrefractivos, materiales en los que cambia el índice de refracción en función de la exposición.

El Niobato de Litio ha sido el que más se ha utilizado en las demostraciones de almacenamiento holográfico, pero no es lo suficientemente sensible para aplicaciones prácticas. Está sujeto a borrado parcial de la información durante la lectura. La utilización de dos longitudes de onda distintas en el registro, elimina la volatilidad durante la lectura.

Los fotopolímeros orgánicos son prometedores como medios irreversibles de almacenamiento. Pueden ser muy sensibles, permitiendo adquirir datos con rapidez y tienen un amplio rango dinámico. Como problemas presentan una alta producción de luz difusa,

lo que dificulta utilizar espesores mayores de una décima de milímetro y se producen distorsiones ópticas por la contracción del material.

La investigación de nuevos materiales es una faceta de la investigación actual, de la que se espera ese medio de registro ideal. Si bien son muchas las aportaciones que se han realizado en este campo de la óptica, aun hoy sigue habiendo contribuciones interesantes, como la holografía digital. Donde se ha sustituido el medio de registro por las matrices de sensores ópticos y la propagación de la luz, en el proceso de reconstrucción, por una recreación matemática.

Para terminar quisiera indicar que, en la Facultad de Ciencias de Zaragoza, hay tres grupos de trabajo que mantienen una investigación fundamental y aplicada en el campo de la Holografía.

1. El dirigido por el profesor Rafael Alcalá, que trabaja sobre nuevos materiales, como los polímeros cristal líquido y polímeros funcionales, para su utilización como materiales ópticos holográficos.
2. El liderado por la profesora M<sup>a</sup> Pilar Arroyo, que desarrolla técnicas de interferometría de moteado y de holografía digital para el estudio experimental en dinámica de fluidos y deformaciones en sólidos.
3. Y el que llevo yo mismo, que realiza aportaciones en el diseño y construcción de elementos holográficos, para su incorporación a diferentes dispositivos ópticos.

## Referencias

- [1] Stroke, G.W., "An Introduction to Coherent Optics and Holography" (Academic Press. New York:1966)
- [2] Applications de L'Holographie. Comptes Rendus du Symposium International. Besançon, juillet 1970, France. Edité para J. Viento, J. Bulabois, J. Pasteur.
- [3] Holography, 1948-1971. Nobel Lecture, December 11, 1971 by Dennis Gabor. Imperial Colleges of Science and Technology, London.
- [4] J.W. Goodman. Introduction to "Fourier Optics", (McGraw-Hill 1968)
- [5] S. Ramón Cajal. "Fotografía de los Colores". Bases Científicas y Reglas Prácticas. (Imprenta y Librería de Nicolás Moya, Madrid 1912)
- [6] Holographic Data Storage. H.J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbos (Eds.) (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2000)
- [7] Thomas Kreis. "Handbook of Holographic Interferometry". Optical and Digital Methods. (Wiley-VCH 2005)