

Holografía: ciencia, arte y tecnología*

(Holography: science, art and technology)

Augusto Beléndez¹

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, Alicante, España
Recibido em 20/6/2008; Revisado em 5/9/2008; Aceito em 24/09/2008; Publicado em 30/4/2009

En el presente trabajo se hace una revisión histórica de los orígenes de la holografía, haciendo especial énfasis en las contribuciones de Gabor, Denisyuk y Leith al desarrollo de la técnica holográfica. Inicialmente se hace mención de los fundamentos físicos de la holografía: interferencia y difracción así como de los procesos involucrados en el registro y reconstrucción de un holograma. El trabajo termina con una breve descripción de algunas de las aplicaciones más importantes de la holografía en la ciencia, la técnica y el arte.

Palabras-clave: holografía, historia de la física, aplicaciones de la holografía.

This article provides a historical review of the origins of holography, placing particular emphasis on the contributions made by Gabor, Denisyuk and Leith to the development of holographic techniques. First of all the physical basis of holography is discussed: interference and diffraction, together with the processes involved in recording and reconstructing holograms. The article finishes with a brief description of some of the most important applications of holography in the fields of science, technology and art.

Keywords: holography, history of physics, applications of holography.

1. Introducción

Stephen Benton, uno de los pioneros de la holografía, señaló en más de una ocasión que “es la intersección de ciencia, arte y tecnología lo que hace la holografía tan interesante” [1]. Es cierto que la holografía es una de las ramas más importantes de la óptica moderna y ha dado lugar a un gran número de aplicaciones científicas y tecnológicas y ha proporcionado técnicas que pueden utilizarse casi en cualquier área de investigación pura o aplicada, pero no es menos cierto que la holografía es uno de los pocos campos científicos que ha proporcionado un medio para el arte.

Sin lugar a dudas la reconstrucción de una imagen en tres dimensiones dando la sensación perfecta de relieve es, sin duda, una de las realizaciones más espectaculares y más conocidas de la holografía, pero existen otras muchas aplicaciones en diferentes ámbitos [2]. La interferometría holográfica, los elementos ópticos holográficos, las memorias holográficas, el procesado óptico de información, los hologramas generados por ordenador, la holografía digital, la litografía holográfica o los hologramas de seguridad son sólo una pequeña muestra de las numerosas aplicaciones científicas y

técnicas basadas en el método holográfico. Además, la holografía no sólo se limita hoy en día al espectro visible, sino que pueden hacerse hologramas utilizando ondas de otras regiones del espectro electromagnético dando lugar a la holografía infrarroja, ultravioleta, de microondas o de rayos X. También se han desarrollado una holografía acústica, una holografía de electrones o una holografía de neutrones que permite, por ejemplo, obtener imágenes holográficas de átomos utilizando neutrones térmicos. Son numerosas las aplicaciones de la holografía en medicina dentro de la oftalmología, odontología, otología, ortopedia y endoscopia. Se han investigado las conexiones de la holografía y la teoría especial de la relatividad y existe un concepto denominado “universo holográfico” relacionado con los agujeros negros y la cosmología. Además de en la física, la holografía se ha aplicado con éxito a campos tan diversos como la arqueología, paleontología, geografía, música, geología, biología, química, medicina, arquitectura, ingenierías civil, industrial, aeronáutica, naval, de telecomunicación, agrónoma, etc. Todo esto es sólo una pequeña muestra de las posibilidades que ofrece la técnica holográfica.

A la vista de todo lo anterior, puede verse como la

** El texto de este artículo está basado en la lección inaugural “Holografía: ciencia, arte y tecnología” impartida por el autor el 28 de septiembre de 2007 en el solemne acto de apertura del curso académico 2007-2008 de la Universidad de Alicante, España.

¹E-mail: a.belendez@ua.es.

holografía abarca áreas de investigación muy amplias, a la vez que muy distintas, por lo que resulta imposible presentar todas ellas en este artículo. Por esta razón, se va a limitar el contenido del mismo sólo a los siguientes aspectos. En primer lugar, se hará mención a los fundamentos físicos de la holografía, es decir, a la interferencia ya la difracción, así como a los procesos involucrados en el registro y la reconstrucción de un holograma. En segundo lugar se hará una revisión de los orígenes y posterior desarrollo de la holografía, incidiendo en la forma en que sus tres principales protagonistas, Gabor, Denisyuk y Leith, pusieron los cimientos sobre los que comenzó a edificarse la holografía. Finalmente se mostrarán algunas de las aplicaciones de la holografía en diversas parcelas de la ciencia, el arte y la tecnología.

2. Interferencia y difracción

Como señala Saxby en su libro “Practical holography” [3], “para un físico un holograma es el registro de la interacción de dos ondas coherentes, provenientes de fuentes puntuales y monocromáticas, en la forma de un patrón microscópico de franjas interferenciales; para un lego en física, pero quizás bien informado, es una película fotográfica o placa que ha sido expuesta a la luz del láser y procesada de modo que al ser iluminada adecuadamente produce una imagen tridimensional; para alguien menos informado la holografía es sólo algún tipo de fotografía tridimensional”. Es cierto que tanto la fotografía convencional como la holografía hacen uso de una película fotográfica u otro material fotosensible, pero quizás sea sólo esto lo que ambas tienen en común. La fotografía y la holografía producen la imagen de forma completamente diferente, y no resulta posible describir en los mismos términos el modo en que se forman los dos tipos de imágenes, la fotográfica y la holográfica, ya que para explicar la formación de la imagen holográfica es necesario recurrir a los conceptos de interferencia y difracción, ambos característicos de las ondas [4-6]. Es evidente, por tanto, que los fundamentos físicos sobre los que se sustenta la técnica holográfica hay que buscarlos en la naturaleza ondulatoria de la luz, demostrada de forma convincente hacia 1801 por un médico inglés llamado Thomas Young (Fig. 1) con uno de los “experimentos más bellos de la física” [7, 8], el de la interferencia de la doble rendija, también conocido como “el experimento de Young de la doble rendija” [4]. Gracias a su mente independiente y tenaz, Young pudo probar con este experimento la *naturaleza ondulatoria* de la luz en contraposición a la *naturaleza corpuscular*, promovida nada más y nada menos que por un científico de tanto peso y renombre como era Isaac Newton (1642-1727) [6].



Figura 1 - Thomas Young (1773-1829).

Desde el siglo XVII coexistieron dos teorías sobre la naturaleza de la luz: la teoría corpuscular, avalada por Newton, y la teoría ondulatoria, defendida por Christian Huygens (1629-1695) (Fig. 2). Desde los tiempos de Newton hasta los primeros años del siglo XIX, la teoría corpuscular de la luz gozó del favor de la mayor parte de los entonces conocidos como “filósofos de la naturaleza”, básicamente por la autoridad de Newton. De hecho, el gran peso que tenía su opinión cayó como una losa sobre la teoría ondulatoria durante el siglo XVIII, aplastando a sus partidarios [4, 9].



Figura 2 - Christian Huygens (1629-1695).

Sin embargo, entre los años 1801 y 1803 Young presentó unos artículos ante la *Royal Society* exaltando la teoría ondulatoria de la luz y añadiendo a ella un nuevo concepto fundamental, el *principio de interferencia*. Cuando se superponen las ondas provenientes de dos fuentes luminosas puntuales, sobre una pantalla colocada paralela a la línea de unión de los dos orificios, se producen franjas claras y oscuras regularmente espaciadas. Éste es, sin duda, el primer experimento en el que se pone de manifiesto que la superposición de luz puede producir oscuridad. Este fenómeno se conoce como *interferencia* (Fig. 3) y con este experimento se corroboraron las ideas intuitivas de Huygens en relación al carácter ondulatorio de la luz.

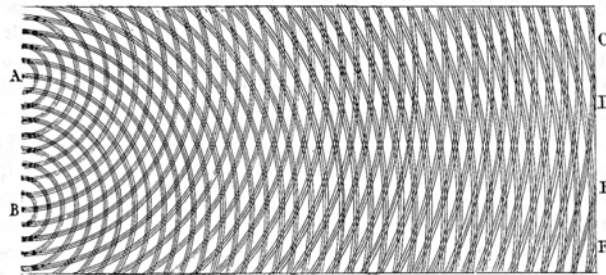


Figura 3 - Diagrama de Young de un patrón de interferencia producido por una serie de ondas procedentes de dos fuentes distintas [7].

Una condición esencial para que se produzcan interferencias es necesario que la luz sea coherente. Para poder tener un diagrama de interferencia entre dos o más ondas es necesario que las ondas sean tales que tengan la misma frecuencia y mantengan una diferencia de fase constante, es decir, que provengan de fuentes de luz coherentes, por lo que la coherencia de la luz es una medida de su capacidad para producir interferencias. Hay dos tipos de coherencia: temporal y espacial. La luz que no posee ambas no puede producir interferencias apreciables. La coherencia espacial está relacionada con la monocromaticidad, mientras que la coherencia espacial es en cierto modo una medida del tamaño del foco luminoso, siendo máxima si el foco luminoso es puntual. La luz blanca emitida por una bombilla o por un tubo fluorescente no es coherente y su longitud de coherencia es de menos de una décima de micra, sin embargo, la luz de un láser sí es coherente, siendo posible fabricar láseres con longitudes de coherencia de cientos de metros.

Al igual que Young fue el responsable del resurgimiento de la teoría ondulatoria de la luz en Inglaterra, Augustin Fresnel (1778-1827) (Fig. 4) lo fue en Francia [6]. Ajeno en un principio a los trabajos realizados por Young varios años antes, Fresnel sintetizó los conceptos de la teoría ondulatoria de Huygens y el principio de interferencia y analizó el fenómeno de la difracción, también característico del movimiento ondulatorio, que se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo. El principio de Huygens-Fresnel

permite calcular los diagramas de difracción producidos tanto por obstáculos como por aberturas, siendo posible decir que este principio lleva a la siguiente conclusión: “la luz se difracta y la interferencia está en el corazón del proceso” [4].



Figura 4 - Augustin Jean Fresnel (1778-1827).

3. La técnica holográfica

La fotografía se conoce desde el siglo XIX, por lo que se está acostumbrado a observar el mundo tridimensional comprimido en la bidimensionalidad de la página de un álbum de fotos, una revista o la pantalla de cine o de televisión [2]. Todos estos medios comparten la limitación de ser sólo representaciones de la intensidad de las ondas luminosas. La luz que se refleja en una fotografía lleva consigo información acerca de la amplitud de la onda que provenía del objeto original pero no su fase. Sin embargo, si pudieran reconstruirse de algún modo tanto la amplitud como la fase de la onda original, la onda reconstruida resultante no se distinguiría de la onda original. Cuando se observa un objeto, lo que llega a nuestros ojos es la onda emitida o difundida por el mismo. Por tanto, si de alguna manera se consiguiera reproducir dicha onda, y ésta alcanzara nuestros ojos, parecería provenir del objeto original y seríamos capaces de ver la imagen formada en una tridimensionalidad perfecta, exactamente como si el objeto estuviera realmente ante nosotros [2, 10]. Precisamente esto es lo que puede conseguirse mediante la holografía, que consta de dos etapas denominadas registro y reconstrucción. Mediante el proceso de registro se almacena en determinados materiales fotosensibles [10-12],

y en forma de franjas de interferencia, la información necesaria para posteriormente reconstruir un frente de onda casi idéntico al que dio lugar a esa información. El material fotosensible impresionado y procesado, soporte de esta información, constituye el holograma, del griego “holos” que significa la totalidad [12]. Una diferencia fundamental entre la holografía y la fotografía es que en aquélla en vez de almacenarse la imagen bidimensional del objeto se almacena información suficiente para poder reconstruir la onda objeto misma. Puede decirse que la holografía permite “congelar” la onda procedente del objeto y posteriormente “ponerla otra vez en marcha”, por lo que, como señala Abramson, “un holograma es ciertamente como una ventana con memoria” [13].

En la etapa de registro se hace interferir la onda emitida o difundida por un objeto con una onda de referencia conocida (Fig. 5). El “código holográfico” consiste en “mezclar” la onda objeto con la onda de referencia y registrar su patrón interferencial en un material fotosensible como una película fotográfica, dando lugar al holograma. Éste contiene información codificada tanto de la amplitud como de la fase de la onda objeto. Para decodificar la información almacenada en el holograma y reconstruir de este modo una réplica de la onda objeto original, en la etapa de reconstrucción se ilumina el holograma con una onda análoga a la onda de referencia utilizada en la etapa de registro. Esta onda es difractada por la compleja estructura de franjas almacenada en el holograma, generándose una onda imagen de características similares a la onda objeto original. De esta forma, si se mira a través del holograma se verá una imagen tridimensional del objeto, aún cuando éste ya no se encuentre allí, pues se dispone de su onda y es ésta la que alcanza nuestros ojos. Este frente de onda imagen reconstruido es prácticamente indistinguible de la onda original procedente del objeto y puede producir todos los efectos visuales del haz primitivo.

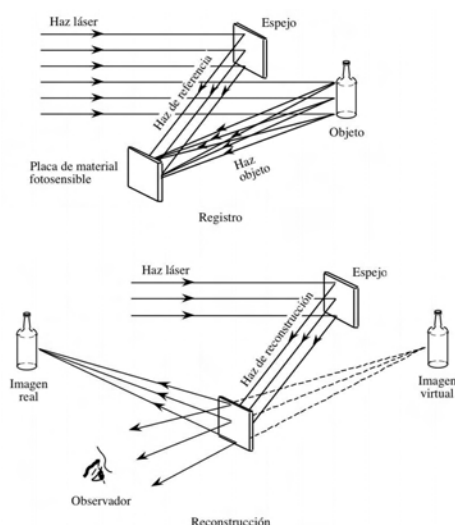


Figura 5 - Registro y reconstrucción de un holograma.

4. Los distintos “orígenes” de la holografía

Existe la falsa creencia popular de que la ciencia es una empresa impersonal, desapasionada y completamente objetiva. Mientras que la mayor parte de las otras actividades humanas están dominadas por modas y caprichos, se supone que la ciencia se atiene a reglas de procedimiento establecidas y pruebas rigurosas. Lo que cuenta son los resultados y no las personas que los consiguen. Nada más lejos de la realidad. La ciencia, como cualquier empresa humana, es una actividad impulsada por personas y está igualmente sujeta a modas y caprichos, a pasiones y casualidades, a fracasos y éxitos. Los inicios de la holografía son un claro ejemplo de todo ello. Aunque en el devenir de la holografía, sobre todo en sus primeros años, pueden encontrarse numerosos héroes e incluso algunos villanos, lo cierto es que sus principales protagonistas fueron tres [14-16]. El primero fue Dennis Gabor (1900-1979), un ingeniero húngaro afincado en Inglaterra, inventor de la técnica holográfica que el denominó *reconstrucción del frente de onda* y por la que recibió el premio Nobel de física en 1971. Sin embargo, esta idea no habría pasado de ser un *white elephant* [17, 18], un objeto superfluo y sin aplicaciones, si no hubiera sido por la aparición de dos nuevos personajes en escena: Yuri Denisyuk (1927-2006) en la antigua Unión Soviética y, sobre todo, Emmett Leith (1927-2005) en los Estados Unidos. También fueron tres los lugares – y además muy diferentes– en los que la holografía dio sus primeros pasos: un laboratorio industrial de una empresa de ingeniería eléctrica en Rugby, Inglaterra; un instituto científico estatal en lo que era entonces Leningrado, en la antigua Unión Soviética; y un laboratorio de investigación clasificado de la Universidad de Michigan que trabajaba en proyectos para el ejército de los Estados Unidos en Willow Run, cerca de Ann Arbor. Sin embargo, todavía hay un protagonista más que no se puede dejar de mencionar pues fue el revulsivo que reactivó la holografía de forma “explosiva” a principios de la década de 1960: el láser, uno de los más importantes y versátiles instrumentos científicos. Theodore Maiman (1927-2007), un físico de los laboratorios de investigación *Hughes*, obtuvo el 16 de mayo de 1960 su primera emisión láser. Poco después, Maiman tenía listo un láser de rubí. Como anécdota mencionar que Maiman envió un artículo a una de las revistas de física más prestigiosas, el *Physical Review* (hoy *Physical Review Letters*). Sin embargo, sorprendentemente el editor rechazó el artículo. Por esta razón, el primer anuncio del láser apareció en la revista británica *Nature* en 1960. El láser es de gran importancia, no sólo por sus múltiples aplicaciones científicas y técnicas, sino porque fue un factor crucial en el renacer de la óptica [19]. Alrededor de 1950, precisamente en la época en que Gabor inició sus trabajos sobre holografía, la óptica se consideraba una disciplina con un gran pasado, pero

sin visos de tener un gran futuro. Sin embargo, el láser cambió esta percepción drásticamente. Junto con el renacer de la holografía, el láser dio lugar a un desarrollo nuevo y vigoroso de la óptica en campos como la optoelectrónica, la óptica no lineal o las comunicaciones ópticas, desarrollo que continúa en la actualidad.

4.1. La “reconstrucción del frente de onda” de Gabor

Dennis Gabor (Fig. 6) nació en 1900 en Budapest. De ascendencia judía, su familia paterna provenía de Rusia mientras que su familia materna de España [20, 21], posiblemente de una familia de judíos sefardíes llegados a Hungría en el siglo XVIII. Fueron Julio Verne y, quizás el más grande de todos los inventores, Thomas Edison, los ídolos en su niñez [20]. Aunque la física le fascinaba, el joven Gabor decidió estudiar ingeniería [20, 21]. Como él mismo escribió más tarde, “ser físico no era todavía una profesión en Hungría, con un total de media docena de cátedras de física, y ¿quién podría haber sido tan presuntuoso para aspirar a una de ellas?” [22]. Gabor inició estudios de ingeniería mecánica en la Universidad Politécnica de Budapest que concluyó en la Universidad de Berlín donde obtuvo el Diploma en Ingeniería Eléctrica en 1923 y el Título de Doctor Ingeniero en 1927. Ese mismo año entró a trabajar en uno de los laboratorios de física de la compañía *Siemens* de Berlín, en la que comenzó a desarrollar algunos de sus múltiples inventos. Prueba de su fructífera labor como inventor es que realizó 62 patentes entre 1928 y 1971 [21].

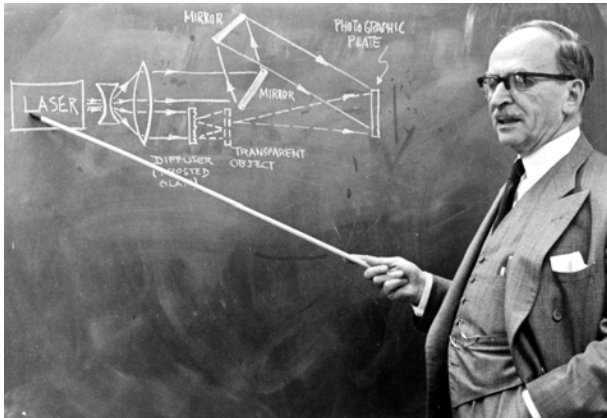


Figura 6 - Dennis Gabor (1900-1979) (*AIP Emilio Segré Visual Archives, Physics Today Collection*).

Dennis Gabor forma parte de una emigración de húngaros brillantes, todos nacidos entre 1879 y 1908 [20], entre los que se encontraban, además de Gabor, el biofísico Georg von Békésy (1899-1972) –premio Nobel de fisiología y medicina–, Theodore von Kármán (1881-1963) –investigador en aerodinámica–, el pionero de la informática John von Neumann (1903-1957), y los físicos nucleares Leo Szilard (1899-1964), Edward

Teller (1908-2003) –padre de la bomba de hidrógeno– y Eugene Wigner (1902-1995) –premio Nobel de física–. Además, Gabor, von Karman, von Neumann, Szilard, Teller y Wigner habían nacido en el mismo barrio de Budapest.

En 1933, y tras la llegada de Hitler al poder, a Gabor no le fue renovado su contrato con la compañía Siemens debido a su origen judío, por lo que tuvo que abandonar Alemania. Tras una breve estancia en Budapest, y gracias a la intervención de su amigo el ingeniero Allibone [20], Gabor marchó a Inglaterra en 1934 donde comenzó a trabajar en la *British Thomson Houston Company*. Durante la Segunda Guerra Mundial su compañía se dedicó a desarrollar distintos dispositivos para el ejército británico, sobre todo relacionados con el radar, pero Gabor fue excluido de dichas investigaciones, aunque podía seguir trabajando fuera de la zona de seguridad de la empresa en la mejora del microscopio electrónico [20]. Con este instrumento se había aumentado en cien veces el poder de resolución de los mejores microscopios ópticos y se estaba muy cerca de resolver las estructuras atómicas. La longitud de onda de De Broglie asociada a los electrones rápidos, alrededor de una décima de ángstrom, era lo bastante pequeña, pero los sistemas no eran lo bastante perfectos [2]. Su limitación estaba relacionada con la aberración esférica de las lentes magnéticas del microscopio. Para resolver este problema Gabor se planteó la siguiente pregunta: “¿por qué no tomar una mala imagen electrónica, pero que contenga la información ‘total’, reconstruir la onda y corregir por métodos ópticos?” [23]. La contestación a esta pregunta se le ocurrió en 1947 mientras esperaba para jugar un partido de tenis [22] y consistía en considerar un proceso en dos etapas. En la primera etapa, el *registro*, con el haz de electrones del microscopio electrónico produciría la imagen interferencial entre el haz objeto y un fondo coherente (haz de referencia), imagen que registraría en una placa fotográfica. 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) de la onda objeto. En la segunda etapa, la *reconstrucción*, iluminaría mediante luz visible que, difractada por el holograma, reconstruiría el frente de onda original y lo podría corregir para obtener una buena imagen. Como ya se ha señalado anteriormente, para conseguir franjas de interferencia contrastadas era necesario disponer de una fuente de iluminación de gran coherencia, la cual no existía en aquellos años. A pesar de ello, Gabor realizó en 1948 el primer holograma utilizando en el registro y en la reconstrucción luz filtrada proveniente de una lámpara de mercurio, que constituía una de las mejores fuentes de luz coherente antes del láser. El objeto que utilizó Gabor para realizar el primer holograma fue una diapositiva circular transparente de apenas 1,4 mm de diámetro y que contenía el nombre de tres físicos a los que Gabor consideraba importantes por haber puesto

los fundamentos físicos de su técnica de reconstrucción del frente de onda: Huygens, Young y Fresnel. Los resultados fueron presentados en Londres en una conferencia sobre microscopía electrónica en 1948 (Fig. 7) y publicados ese mismo año en un breve artículo en la revista *Nature* de apenas dos páginas [24]. En septiembre de 1948 el periódico *New York Times* publicó la primera noticia sobre esta nueva técnica y en diciembre Gabor presentó una patente relacionada con la mejora de imagen en microscopía electrónica (Fig. 8) [25].



Figura 7 - Póster de la conferencia de Gabor de 1948 (*The MIT Museum - Holography Collection from the Museum of Holography*).

En el año 1949 Gabor consiguió un puesto de profesor de Electrónica en el *Imperial College* de Londres, fundamentalmente gracias a la buena acogida que tuvo su técnica de la *reconstrucción del frente de onda* entre científicos como Lawrence Bragg y Max Born, ambos premios Nobel de Física, y Charles Darwin, nieto del evolucionista y Director en aquel entonces del Laboratorio Nacional de Física de Gran Bretaña [16]. En los años siguientes la técnica fue estudiada por unos pocos investigadores además de Gabor [20], entre ellos se encontraban Gordon Rogers (1916-), un antiguo estudiante de doctorado de Lawrence Bragg, Paul Kirkpatrick (1894-1992) en la Universidad de Stanford en California, y sus estudiantes Albert Baez (1912-2007) (padre de las cantantes *folk* Joan Baez y Mimi Fariña) y Hussein El-Sum (1925-1978) y, algo más tarde, por Adolf Lohmann (1928-) en Alemania. El-Sum fue el que realizó la primera tesis doctoral sobre holografía de la historia, presentada en el año 1952. Sin embargo, todos el-

los sólo consiguieron hologramas de imágenes pequeñas y borrosas, y hacia 1954 Gabor estaba sumamente frustrado e intentando, sin apenas éxito, convencer a sus colaboradores que continuaran con las investigaciones que él había iniciado apenas siete años antes. Sin embargo, todos ellos habían perdido el interés por la holografía fundamentalmente debido a dos razones, una relacionada con la imposibilidad de obtener resultados óptimos cuando aplicaban el método al microscopio electrónico, y la otra con la segunda etapa del proceso, la reconstrucción óptica del holograma, que era claramente imperfecta. El método de Gabor generaba un *holograma en eje*, conocido como *holograma de Gabor*, cuya calidad de imagen era bastante pobre, pues un problema básico es que al reconstruir el holograma se forman dos ondas, una divergente, análoga a la onda objeto que forma una *imagen virtual* detrás del holograma, y una convergente que forma una *imagen real* delante del holograma, conocida como *imagen conjugada*. Puede contemplarse la imagen virtual o la real, pero siempre con la otra desenfocada como fondo.

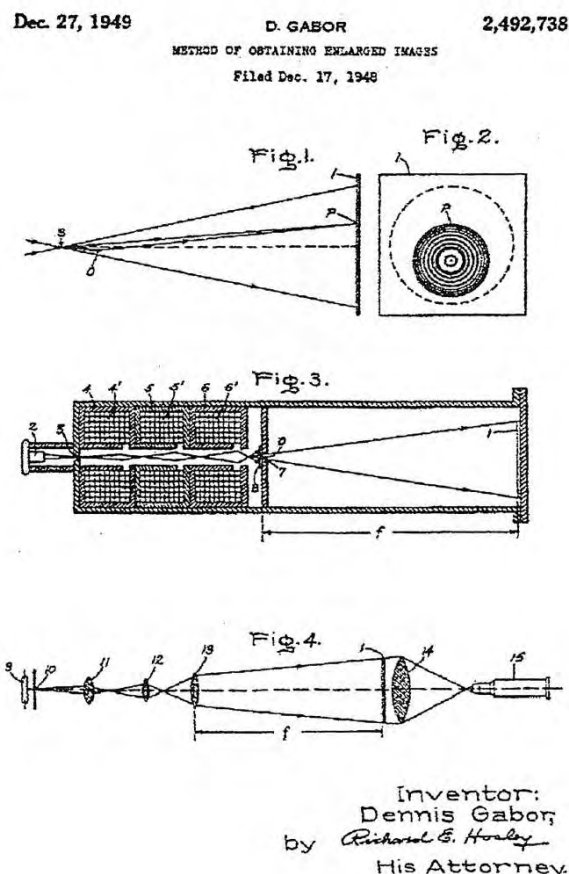


Figura 8 - Patente sobre la mejora de la resolución del microscopio electrónico (P. Greguss, "Dennis Gabor - Inventor of ...", Proc. SPIE 4149, 1, 2000).

Entre 1948 y 1955 se publicaron unos cincuenta artículos sobre el método de *reconstrucción del frente de onda* de Gabor y, hacia 1955, tras investigar varios

montajes ópticos para intentar minimizar el efecto de la imagen conjugada, Gabor abandonó tranquilamente sus investigaciones. Algunos colaboradores de Gabor calificaron la técnica de reconstrucción del frente de onda como un *white elephant*, no teniendo, como algunos de sus inventos anteriores, ninguna perspectiva comercial. En su autobiografía Gabor señala que su invención de la holografía había sido un ejercicio de *serendipity* [22], “don de descubrir cosas sin proponérselo”, un descubrimiento científico afortunado e inesperado realizado accidentalmente. El objetivo original era conseguir una mejora del microscopio electrónico, lo que en su momento no tuvo ningún éxito y sólo en la década de 1990 llegó a realizarse de forma práctica. Sin embargo, tras la invención del láser, su idea original dio lugar a innumerables aplicaciones científicas y tecnológicas, en áreas muy diferentes, todas ellas impensables para Gabor, además de proporcionar un nuevo medio para el arte

4.2. La “fotografía de ondas” de Denisyuk

Como ya se ha señalado, en 1958 los investigadores que habían iniciado los primeros trabajos sobre la *reconstrucción del frente de onda* ya la habían abandonado completamente y habían cambiado de campo de investigación. Mientras Gabor ya era catedrático en el *Imperial College* de Londres y estaba estudiando problemas relacionados con la fusión nuclear al tiempo que escribía sobre las relaciones entre la ciencia y la sociedad, su equipo de la compañía británica de ingeniería eléctrica estaba ahora centrado en la mejora del diseño de sus microscopios electrónicos comerciales. Sin embargo, aproximadamente por esas fechas el concepto de *reconstrucción del frente de onda* de Gabor estaba siendo reinventado en un contexto diferente por Yuri Denisyuk (1927-2006) (Fig. 9), un investigador que trabajaba de forma aislada y que estaba realizando una serie de estudios similares en el centro de investigación óptica más importante de la antigua Unión Soviética, el Instituto Estatal de Óptica Vavilov, en Leningrado [20, 26].



Figura 9 - Yuri Denisyuk (1927-2006) con su retrato holográfico de reflexión (H. J. Caulfield, Ed., *The Art and Science of Holography. A Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk*, SPIE Press, Bellingham, 2003).

En 1954, y bajo la supervisión de Alexander Elkin, Denisyuk comenzó a trabajar en el campo de la instrumentación óptica para la armada soviética y en 1958 decidió doctorarse por lo que Elkin le permitió dedicar parte de su tiempo a llevar a cabo investigaciones para que pudiera realizar su tesis doctoral bajo la dirección de Eugenii Iudin, otro colega del laboratorio [20]. Aunque Iudin falleció pocos meses después, durante los años siguientes Denisyuk fue capaz de continuar su tesis doctoral sin contar con un director de tesis y bajo la única supervisión de Elkin, quien le proporcionaba cierto material para seguir realizando las experiencias de laboratorio que el propio Denisyuk diseñaba. En sus investigaciones iniciales sobre holografía Denisyuk se inspiró tras la lectura del libro de ciencia ficción *Star Ships* del escritor ruso Efremov. El propio Denisyuk escribió en una ocasión que uno de los episodios de este libro le impresionó profundamente [20, 26]. En éste, unos arqueólogos, mientras trabajaban en una excavación, encontraron accidentalmente una extraña placa. Tras limpiar su superficie, y detrás de una capa completamente transparente, apareció una cara mirándolos. La cara estaba aumentada por medio de algún procedimiento óptico, tenía tres dimensiones y un gran realismo, sobre todo en sus ojos. A Denisyuk se le ocurrió la idea de crear tales fotografías por medio de la óptica moderna, lo que años más tarde consiguió mediante lo que se conoce como *holograma de reflexión*. Este tipo de hologramas, que recibieron el nombre de su inventor, *holograma de Denisyuk*, presentan la propiedad de que su reconstrucción se hace con luz blanca.

Para fabricar sus hologramas, Denisyuk hacía incidir las ondas objeto y referencia por las caras opuestas de la placa fotográfica (Fig. 10). El objeto lo situaba junto a una de las caras de la placa e iluminaba la otra cara con un haz de luz filtrado proveniente de una lámpara de mercurio. La onda luminosa, tras atravesar la placa, incide sobre el objeto y la onda reflejada por éste interfiere con la onda incidente dando lugar a un patrón de ondas estacionarias que puede ser registrando en la placa fotográfica. Esta placa, una vez revelada, se ilumina con un haz de reconstrucción de luz blanca y el objeto aparece en su posición original y aproximadamente del mismo color que el de la luz empleada en el registro. En 1962 publicó su descubrimiento bajo el nombre de *fotografía de ondas*. Las fuentes luminosas que disponía Denisyuk eran lámparas de mercurio por lo que sus hologramas eran de objetos con poca profundidad como espejos convexos con grandes radios de curvatura. Más adelante Denisyuk lamentaba no haber utilizado objetos con relieve como monedas, ya que en ese caso habría demostrado la posibilidad de utilizar su técnica para formar imágenes de objetos tridimensionales, lo que desde luego habría proporcionado un mayor éxito a sus investigaciones [26].

Tras completar su tesis doctoral, en 1961 Denisyuk volvió a sus antiguas investigaciones sobre instru-

mentación óptica, siendo muy limitadas sus oportunidades para continuar su trabajo sobre *fotografía de ondas* [26], por lo que la investigación en esta técnica languideció en la Unión Soviética en los años siguientes y para sus contemporáneos la conexión de su trabajo con la *reconstrucción del frente de onda* de Gabor era marginal, siendo ambos esquemas estériles y sin posibles aplicaciones. La *fotografía de ondas* de Denisyuk, recibida al principio con gran escepticismo e incluso con cierto menosprecio [27], jugó un papel trascendental en la evolución futura de la holografía. Las investigaciones de Denisyuk no fueron conocidas fuera de las fronteras de la antigua Unión Soviética hasta finales de la década de 1960 y su posición cambió, como la de Gabor, gracias a los trabajos de Leith y Upatnieks, aunque no fue hasta 1970 cuando sus contribuciones obtuvieron el reconocimiento mundial.

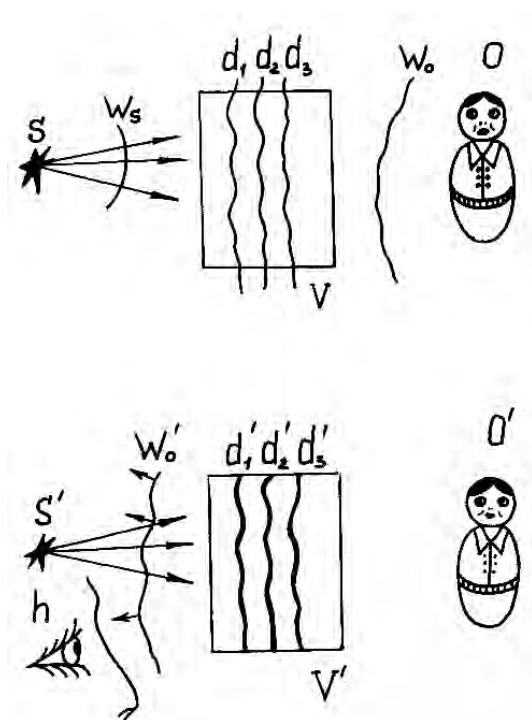


Figura 10 - Registro y reconstrucción de un holograma de reflexión (Y.N. Denisyuk, "My way in Holography", Leonardo **25**, 425 (1992). Dibujo original de Yuri Denisyuk).

4.3. La "fotografía sin lentes" de Leith

Cuando Gabor pronunció su discurso con motivo de la concesión del premio Nobel, indicó que "hacia 1955 la holografía entró en una larga hibernación hasta la invención del láser a comienzos de los años sesenta" [20, 22]. Sin embargo, esta afirmación no es correcta. Emmett Leith (1927-2005) (Fig. 11), el tercer personaje de esta historia, señaló que era erróneo pensar que la investigación en holografía había desaparecido en el periodo comprendido entre 1955 y 1962, sino que en cierto sentido se realizaba de forma "clandestina" en dos labo-

oratorios distintos [13, 20]. Uno de tales ambientes totalmente invisibles para occidente era el Instituto Vavilov de Leningrado, en la antigua Unión Soviética, en el que Denisyuk trabajaba es su *fotografía de ondas*. El otro era un laboratorio clasificado de la Universidad de Michigan, cerca de Ann Arbor en los Estados Unidos, en el que Leith llevó a cabo la tercera formulación independiente de la holografía.



Figura 11 - Emmett Leith (1927-2005) (AIP Emilio Segré Visual Archives, Physics Today Collection).

Leith había entrado en 1952 en este laboratorio para trabajar en un programa militar secreto relacionado con el radar de apertura sintética denominado *Proyecto Michigan* [19, 20, 28, 29] y durante 1955 y 1956 Leith reformuló la teoría del radar de apertura sintética en términos de la óptica física y pensó registrar sobre una película fotográfica la información de las ondas de radar reflejadas por un objeto para poder reconstruirlas posteriormente mediante métodos ópticos. Mientras analizaba las matemáticas que había detrás del proceso comprobó que en las fotografías estaba realmente registrando un patrón interferencial de ondas de radar: Leith acababa de *reinventar* la holografía. En esos dos primeros años Leith desarrolló una teoría completa de la holografía en la región de las microondas [20, 28] y en octubre de 1956 conoció el trabajo de Gabor a través de un artículo publicado por Kirkpatrick y El-Summ [30], comprobando este trabajo tenía relación con sus investigaciones sobre radar [20]. En el año 1960 Juris Upatnieks (1936-) (Fig. 12), un joven ingeniero eléctrico,

comenzó a trabajar con Leith y entre los dos repitieron en su laboratorio de la Universidad de Michigan algunos de los experimentos de Gabor, primero usando como fuente de iluminación una lámpara de mercurio y posteriormente un láser de He-Ne. Leith y Upatnieks contaban con una ventaja respecto a Gabor y Denisjuk, pues a principios de la década de 1960 ya se disponía de láseres comerciales.



Figura 12 - Juris Upatnieks y Emmett Leith (*AIP Emilio Segré Visual Archives, Physics Today Collection*).

Leith y Upatnieks idearon distintas formas de soslayar el problema de las imágenes dobles que tanto había atormentado a Gabor e idearon la técnica del *haz de referencia inclinado* [31]. Haciendo uso de su trabajo previo, Leith adoptó el principio del *radar de observación lateral* y en sus primeros experimentos sobre holografía desplazó el haz de referencia fuera de la dirección del haz objeto. Habían inventado el *holograma fuera de eje*, conocido también como *holograma de Leith y Upatnieks*, en el que las ondas objeto y referencia inciden sobre la misma cara de la placa fotográfica, pero formando un cierto ángulo entre sí. Con ayuda de este nuevo esquema de registro, las imágenes virtual y real quedan separadas angularmente en la etapa de reconstrucción y se resuelve el problema de Gabor de las imágenes dobles. Esta técnica de holografía fuera de eje (Fig. 13) tuvo un enorme impacto y fue crucial para el avance de la holografía como una tecnología realmente útil. A mediados de 1963 Leith y Upatnieks publicaron sus resultados bajo el nombre de *fotografía sin lentes* [32].

En los primeros hologramas fuera de eje que realizaron Leith y Upatnieks utilizaron objetos bidimensionales: textos en color negro sobre fondo blanco, textos transparentes sobre fondo negro y fotografías en blanco y negro. En diciembre de 1963 muchos periódicos americanos como el *New York Times* y el *Wall Street Journal* publicaron la noticia de la nueva

técnica de Leith y Upatnieks, incluyendo fotografías tanto de los hologramas (una simple imagen borrosa, irreconocible) como de las imágenes holográficas [20].

El viernes 3 de abril de 1964, en la última sesión de la reunión de la Sociedad Americana de Óptica celebrada en un hotel de Washington, Upatnieks presentó su nuevo trabajo sobre hologramas de objetos tridimensionales [20]. Al finalizar los quince minutos que duró su exposición anunció a los asistentes que podían ver un holograma de un objeto tridimensional en el hall del hotel. Se trataba del holograma titulado *Train and Bird* (Fig. 14). Cuando se iluminaba el holograma convenientemente con la luz del láser aparecía una imagen tridimensional que tenía todas las propiedades del objeto original. No fue la charla de Upatnieks sino la observación de este holograma lo que realmente impactó a todos los asistentes a la reunión. Podemos imaginarnos una larga cola de especialistas en óptica esperando con ansiedad a que les llegara su turno. Todos ellos estaban confundidos y a la mayoría les resultaba imposible creer lo que estaban viendo: el pequeño tren de juguete parecía real detrás de la placa fotográfica, como si realmente estuviera allí [20, 33-35]. Muchos preguntaron “¿dónde está el tren?”, a lo que Leith contestó “lamento tener que decirlo, el tren está de vuelta en Ann Arbor” [36]. Combinando la luz del láser con la técnica fuera de eje habían abierto el mundo de la holografía al mundo real de los objetos tridimensionales.

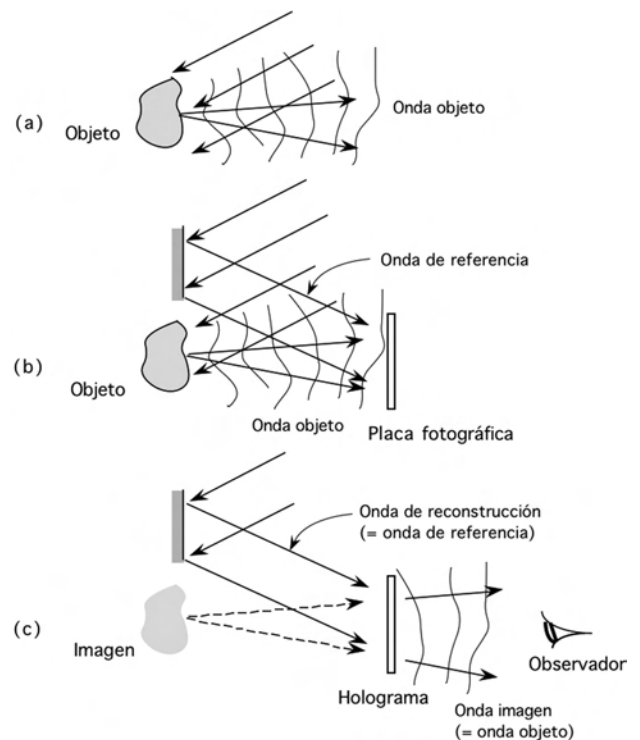


Figura 13 - (a) Onda proveniente de un objeto. (b) Registro y (c) reconstrucción del holograma fuera de eje del objeto.

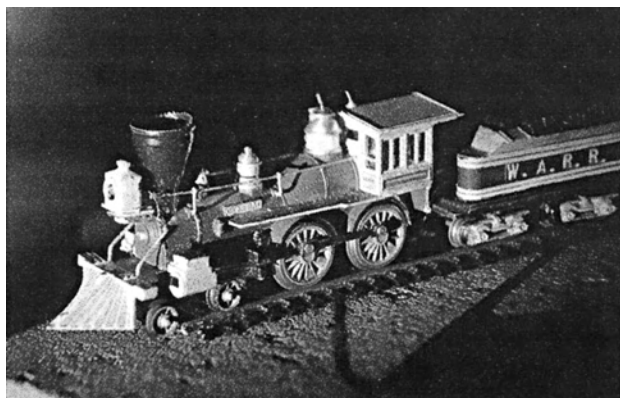


Figura 14 - Fotografía de la imagen de uno de los primeros hologramas de transmisión de un objeto tridimensional (E. N. Leith y J. Upatnieks, “Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects”, *J. Opt. Soc. Am.* 54, 1295-1381, 1964 [37]. Figura cortesía de Juris Upatnieks). El tren original del que se hizo el holograma puede verse en la Fig. 12, justo delante de Upatnieks.

4.4. La “explosión” holográfica

En las casi dos décadas transcurridas desde 1947 y 1964 la holografía era un *collage* construido desde distintas perspectivas [13, 20]. El concepto de *reconstrucción del frente de onda* de Gabor como una nueva forma de microscopía que había interesado sólo a unos pocos investigadores y luego fue abandonado; la *fotografía de ondas* de Denisjuk como una forma de obtener imágenes tridimensionales a partir de la fotografía de Lippman que inicialmente convenció a pocos científicos; y la *fotografía sin lentes* de Leith y Upatnieks, formulada tomando como punto de partida la teoría de la comunicación a partir de investigaciones relacionadas con el radar de apertura sintética. La visión excitante en 1964 del holograma tridimensional de Leith y Upatnieks reactivó de “forma explosiva” el interés por la holografía. Cientos de investigadores empezaron a relacionar estos tres trabajos realizados de forma independiente y en los años siguientes a la presentación del holograma del tren se publicaron más de mil artículos científicos sobre el registro de hologramas con láser [38], lo que contrasta con los apenas cincuenta trabajos publicados entre 1947 y 1955. Era necesario, sin embargo, buscar una denominación única para este nuevo campo que englobara lo que antes se había conocido de tres formas distintas: *reconstrucción del frente de onda*, *fotografía de ondas* y *fotografía sin lentes*. No está claro quien acuñó el término “holografía” para designar a esta nueva área, ya que hay varios investigadores que reclamaron la paternidad del mismo. Lo cierto es que la holografía, un campo con un potencial intelectual y comercial extraordinario, había nacido. Es evidente que la terminología científica tiene un gran impacto, y no sólo a nivel científico, sino también social, filosófico e incluso económico [39], por lo que la denominación *holografía* para esta ‘nueva ciencia’, una única palabra,

tenía todas las de ganar.

En 1966 George Stroke (1924-), también profesor de la Universidad de Michigan publicó *An Introduction to Coherent Optics and Holography* [40], el primer libro en el que se exponían los fundamentos teóricos de la nueva técnica. Se vendieron 3665 copias sólo durante el primer año, un número respetable para un texto de estas características, y hasta 1999 habían sido más de cincuenta mil los ejemplares vendidos [41]. Hasta el año 2000 se habían publicado más de veinte mil artículos sobre holografía en revistas especializadas y presentado más de diez mil comunicaciones en congresos, siete mil patentes, miles de libros y un número similar de tesis doctorales [20].

La primera exposición de holografía artística tuvo lugar en Michigan en 1968 y la segunda en Nueva York en 1970, mientras que en 1971 comenzó una escuela de holografía en San Francisco, la primera en la que científicos, ingenieros y artistas podían aprender la nueva técnica [36]. De este modo la holografía se convirtió en un ejemplo inusual de campo científico en el que participaron en su desarrollo grupos de personas de muy distinta procedencia, desde físicos e ingenieros hasta artistas [42, 43].

La explosión holográfica, originada gracias a los trabajos de Leith y Upatnieks y de otros investigadores de la Universidad de Michigan, centro de referencia de la holografía mundial a mediados de la década de 1960 [20], también *rehabilitó* la figura de Gabor que pasó de ser prácticamente un desconocido a estar a finales de los años sesenta en la lista de los candidatos al premio Nobel. La Real Academia Sueca de las Ciencias anunció la concesión del premio Nobel de Física a Dennis Gabor en 1971 “por la invención y desarrollo del método holográfico” (Fig. 15).



Figura 15 - Galardonados con los premios Nobel de 1971. De izquierda a derecha, Simon Kuznets (economía), Pablo Neruda (literatura), Earl Sutherland (fisiología y medicina), Gerhard Herzberg (química) y Dennis Gabor (física). (Archivo fotográfico del Comité del Premio Nobel).

Gabor, consciente de que los trabajos realizados por otros muchos investigadores habían jugado un papel fundamental en esta concesión, finalizó la lección que pronunció con motivo de dicha concesión expresando su

más sincero agradecimiento a todos ellos que le habían ayudado con su trabajo a conseguir los más altos honores científicos [23].

En esta revisión de los orígenes y desarrollo de la holografía no podemos a Stephen Benton (1941-2003) (Fig. 16), científico del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) [44], que es otro de los investigadores que más ha influido en el desarrollo y difusión de la holografía. En 1968, cuando contaba con 27 años, desarrolló un tipo de holograma conocido como *holograma de arco iris* o *de Benton* [45], que tiene gran importancia al tratarse de un holograma de transmisión que no necesita del láser para su reconstrucción sino que se puede ver con luz blanca creando una imagen en colores en función del ángulo con el que se observa, aunque para ello se sacrifica el paralaje vertical manteniendo sólo el horizontal, lo cual no tiene mucha importancia. En cualquier caso, el aspecto más importante es que el holograma de arco iris permite la producción masiva de hologramas utilizando la técnica de “estampado” (*embossing* en inglés) en plástico aluminizado siendo posible duplicar el holograma millones de veces con un bajo coste. Estos hologramas se utilizan en sistemas de seguridad y la primera vez que aparecieron en documentos de este tipo fue en tarjetas de crédito en 1983. El holograma de arco iris de un águila apareció en la portada de la revista *National Geographic* de marzo de 1984, lo que supuso la distribución de once millones de hologramas en todo el mundo. Benton es una pieza clave en el desarrollo de la holografía moderna y no sólo por sus contribuciones científicas y tecnológicas, sino que también destaca su faceta artística. Benton señaló en una ocasión que “la creatividad no pertenece solamente al dominio del arte, existe en todas las áreas de nuestra existencia y uno de los aspectos más interesantes del medio emergente que es la holografía es la relación simbiótica que se da entre las ciencias y las artes” [46].



Figura 16 - Stephen Benton (1941-2003) (Special Issue: Tribute to Professor Stephen A. Benton, *Holography-SPIE's International Technical Working Group* 15, (2004). Fotografía de R.D. Rallison).

5. Algunas aplicaciones de la holografía

En 1986 Leith señaló que “la holografía por sí misma puede parecer un campo de investigación no muy amplio, pero si la combinas con otros campos conseguirás un área lo suficientemente grande para poder dedicarle toda una vida” [43] y prueba de ello es que la técnica holográfica ha proporcionado y sigue proporcionando innumerables aplicaciones en multitud de campos científicos y tecnológicos. Entre ellos, podemos mencionar la *interferometría holográfica* [47] que permite analizar las deformaciones de un objeto debidas a esfuerzos, vibraciones o variaciones de temperatura, visualizar los modos de vibración de altavoces, instrumentos musicales o complejas estructuras, o realizar ensayos no destructivos. Fueron Powell y Stetson (miembros del Grupo de Óptica de la Universidad de Michigan) los que en 1964 descubrieron de forma accidental las franjas de interferencia en el holograma de un objeto deformado [20], aunque ese mismo año también Leith y Upatnieks, por un lado, y Hildebrand y Haines (también de la Universidad de Michigan), por otro, se dieron cuenta de las posibilidades de la holografía en interferometría [20]. La Fig. 17 muestra el estudio mediante interferometría holográfica en tiempo real de la distribución de temperatura en el interior de una bombilla [48]. A lo largo de las líneas que aparecen en el interferograma la temperatura es constante.

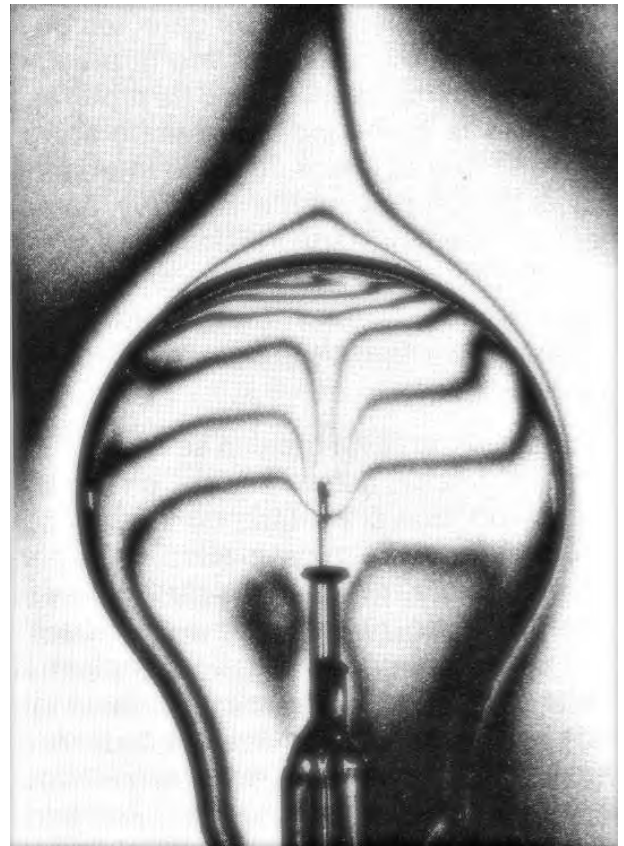


Figura 17 - Estudio mediante interferometría holográfica de la distribución de temperatura en el interior de una bombilla [8].

La holografía también se ha aplicado al *análisis de partículas* [49] microscópicas, siendo posible analizar su tamaño, posición, desplazamiento y velocidad. Permite estudiar desde aerosoles hasta el plancton marino e incluso se ha utilizado para analizar la dinámica de partículas microscópicas y el crecimiento de cristales en condiciones de microgravedad mediante experimentos realizados a bordo del trasbordador espacial *Discovery* en los que se registraron más de mil hologramas [50].

También se fabrican *elementos ópticos holográficos* [51] como lentes, espejos, redes de difracción y otros dispositivos más complejos como concentradores solares, interconectores de fibras ópticas, *scanners* con los que se leen los códigos de barras o los visores que utilizan los pilotos de aviones, conocidos como *head-up displays* y cuya función es formar la imagen en el infinito de la información presentada en una pantalla y superponerla con los objetos observados en el mundo exterior.

Se pueden obtener *hologramas generados por ordenador*, siendo posible realizar figuras geométricas en el espacio o representar objetos en vías de fabricación sin que sea necesario construir modelos. Estos hologramas son sólo una parte de un campo más amplio conocido como *holografía digital* [52].

Los *hologramas de seguridad* [53] son quizás la aplicación más importante de la holografía desde el punto de vista comercial. La dificultad técnica que tiene la realización de algunos hologramas y el hecho de que sólo con medios técnicos complejos y sofisticados sea posible producir en serie copias de un holograma original han hecho de la holografía una técnica adecuada para sistemas de seguridad como los utilizados en tarjetas de crédito, billetes de banco (Fig. 18), documentos de identidad o etiquetas de productos comerciales, incluidos algunos productos farmacéuticos que se comercializan en el sudeste asiático, donde la venta de medicinas ilegales está muy extendida [54].



Figura 18 - Hologramas de seguridad de billetes.

En nuestra sociedad, dominada por las tecnologías

de la información, la utilización de la holografía en el *almacenamiento de información* es una de las aplicaciones que presentan en estos momentos más futuro e interés [55, 56]. Mediante el multiplexado se puede registrar un gran número de hologramas en una misma placa y posteriormente es posible recuperar la información separadamente. Éste es el principio de las *memorias holográficas* [57] en las que se puede almacenar en poco espacio una gran cantidad de información. Aunque las mayores dificultades técnicas para llevarla a la práctica han estado relacionadas con la obtención de un material de registro adecuado, ya se han fabricado los primeros prototipos de sistemas de almacenamiento holográfico con discos holográficos con una capacidad de almacenamiento de 300 Gb, el equivalente a más de sesenta DVDs en un solo disco, y se sigue investigando para obtener mayores capacidades de almacenamiento, incluso del orden del Tb.

En cuanto a la idea original de Gabor de utilizar la holografía en la mejora de la calidad de imagen del microscopio electrónico, hubo que esperar casi cuarenta años para poder disponer de haces coherentes de electrones que hicieran posible llevar a cabo esta aplicación [58].

En el año 1968 se publicó en la revista *Leonardo* un artículo en el que se señalaba la posibilidad de utilizar la holografía como una nueva forma de *arte* [59] y algunos artistas se adentraron en la aventura holográfica como Salvador Dalí, que realizó en 1972 una exposición que incluía hologramas en la Galería Knoedler de Nueva York a la que asistió el propio Gabor. Casi simultáneamente Harriet Casdin-Silver [60-62] en Estados Unidos, Margaret Benyon [63-65] en Gran Bretaña y Carl Frederich Reuterswärd [66] en Suecia, iniciaban su andadura en el intento de utilizar la holografía con fines creativos [67]. Casdin-Silver se inició en el MIT bajo la tutela de Benton, mientras que Reuterswärd fue asistido técnicamente por científicos suecos como Nilsson, Abramson o Bjelkhagen [20], lo que es una prueba más de la colaboración entre artistas y científicos en el campo de la holografía. Es evidente que la característica de la holografía que inicialmente se impone con más fuerza es su capacidad de reproducir imágenes tridimensionales de gran realismo, a veces tan auténtico como el de los objetos realmente existentes [67]. Este efecto es sin duda especialmente sorprendente en aquellos hologramas en los que la imagen reconstruida “flota” en el aire saliéndose de la placa holográfica, sin que seamos capaces asir con nuestras manos los objetos que aparentemente están ahí, ante nuestros ojos [67] (Fig. 19). Es evidente, por tanto, que la holografía posee un innegable interés como una de las técnicas más revolucionarias de creación de imágenes tridimensionales y su capacidad de atracción-fascinación es enorme [2, 68].

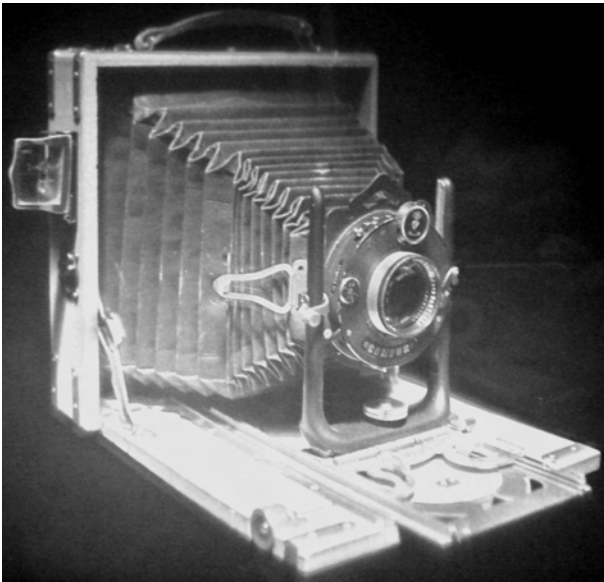


Figura 19 - Fotografía del holograma de reflexión de una cámara fotográfica antigua (Deutsches Museum, Munich, Alemania). Fotografía de A. Beléndez.

Frente al espacio estático y constante de la pintura o la fotografía, el espacio holográfico implica el movimiento del espectador y una variación de la imagen en tanto en cuanto se producen ángulos de visión distintos en la percepción dinámica de la imagen holográfica [2, 68]. Lejos de ser una ventana fija abierta a un espacio fijo, el holograma actúa, en este caso, como una ventana con memoria [13, 68]. En la Fig. 20 se muestran tres fotografías de una misma placa holográfica en el que hay multiplexados tres hologramas que pueden observarse mirando desde la izquierda, el frente y la derecha de la placa.

Ha habido, además, un gran número de artistas que han explorado las posibles interacciones de la holografía con otros medios como la pintura, la escultura, la fotografía, etc. [67] y también goza cada vez más de favor la integración de la holografía en entornos arquitectónicos [69], tendencia que se ve favorecida por la mejora de la técnica en la obtención de hologramas de gran formato, como por ejemplo los hologramas de luz blanca del hall de la Universidad de Bremen, Alemania, utilizados para la distribución de la luz del Sol [70].

También es posible realizar *retratos holográficos*, y el primero de ellos fue realizado en Michigan la noche de Halloween de 1967 y fue un autorretrato de Lawrence Siebert [71]. Utilizando láseres pulsantes es posible realizar retratos holográficos pues la alteración de la escena a registrar es prácticamente nula durante el tiempo de duración del pulso. Un retrato holográfico histórico es el holograma de transmisión de Gabor [72] realizado en 1971 con motivo de la concesión del Premio Nobel (Fig. 21).

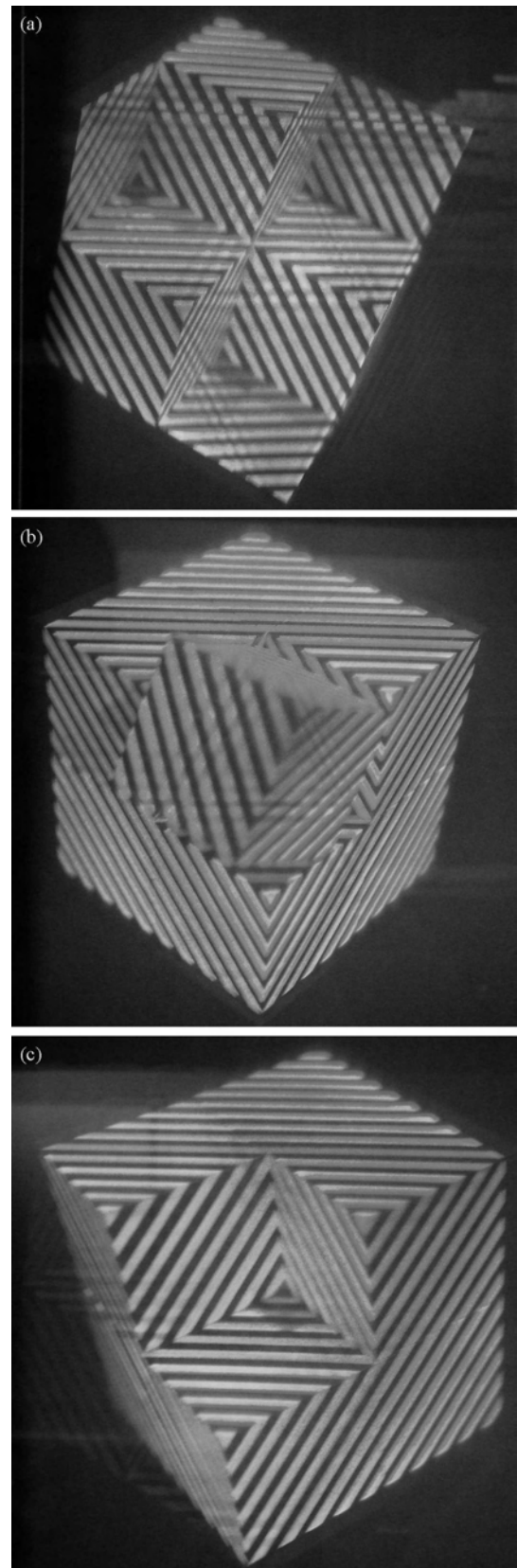


Figura 20 - Tres fotografías de la misma placa holográfica en la que hay multiplexados tres hologramas de reflexión, observando desde (a) la izquierda, (b) el frente y (c) la derecha de la placa (Deutsches Museum, Munich, Alemania). Fotografías de A. Beléndez.



Figura 21 - Dennis Gabor junto con su retrato holográfico realizado en 1971 por R. Rhinehart de la *McDonnell Douglas Electronics Corporation* (*The MIT Museum - Holography Collection from the Museum of Holography*).

La holografía también se utiliza en los museos para sustituir algunos de sus objetos delicados y valiosos por hologramas de los mismos. Éste es, por ejemplo, el caso del *Hombre de Lindow*, una momia de más de 2300 años de antigüedad encontrada en Cheshire, Inglaterra, en 1984. El original se encuentra en una cámara del Museo Británico, en Londres, con temperatura y humedad controladas, mientras que se hizo un holograma de la momia tanto para exponerlo al público como para que distintos investigadores pudieran estudiarla. La realización de hologramas de piezas valiosas ha hecho posible que éstas puedan observarse en lugares distintos de los que realmente se encuentran. Hologramas del tipo Denisyuk se utilizaron en la antigua Unión Soviética y en otros países para la conservación de obras de arte consideradas tesoros arqueológicos, a través de un vasto programa de colaboración entre físicos y museólogos. De hecho, en muchas ocasiones se hace uso de la técnica de Denisyuk para sustituir los objetos originales por hologramas en exposiciones itinerantes. Por ejemplo, el Museo de Holografía de París dispone de colecciones con una riqueza y diversidad únicas, contiene hologramas gigantes, algunos de ellos visibles con luz blanca y otros con luz del láser, junto con una importante colección de representaciones holográficas de obras que se encuentran expuestas en el Museo del Hermitage de San Petersburgo y en el Museo Histórico de Kiev [2]. Entre las piezas de que dispone se encuentra un holograma del sable de Napoleón y otro del bastón del mariscal Davout. A mediados de los años ochenta se realizaron una serie de hologramas de reflexión sobre el tesoro de Villena en la Universidad de Alicante, España (Fig. 22) [48].

Mediante la utilización de tres láseres con longitudes de onda en las zonas de los tres colores primarios [2, 73], la técnica de Denisyuk permite el registro y la reconstrucción de imágenes en color con una calidad impensable. La fidelidad en la reproducción de formas, colores y brillos es tan espectacular que es difícil decir si lo que se ve es el objeto mismo detrás de una ventana de vidrio

o una reproducción holográfica.



Figura 22 - (a) Fotografías de hologramas de reflexión del Tesoro de Villena y (b) detalle de uno de ellos (hologramas realizados por el Dr. José Antonio Quintana, Centro de Holografía, Universidad de Alicante, 1984).

Para terminar señalar que la holografía puede aplicarse utilizando una gran parte del espectro electromagnético, desde imágenes con microondas y radar, pasando por los infrarrojos, el espectro visible y la radiación ultravioleta, hasta los rayos X. También se pueden utilizar haces de electrones o neutrones e incluso ondas sonoras. Existen hologramas artísticos, retratos holográficos, hologramas en color y también se encuentran hologramas en las tiendas de regalos, en libros, en tarjetas de felicitación o en sellos de correos. Los hologramas de seguridad son un gran negocio: las tarjetas de crédito generan cientos de millones de hologramas al año o quizás más y algo parecido sucede con los billetes de banco, hay hologramas en las etiquetas de ciertos productos e incluso ya se han in-

cluido hologramas en ropa deportiva para asegurar su autenticidad y distinguirla de las imitaciones. La interferometría holográfica es una técnica que se aplica en áreas muy diversas, los elementos ópticos holográficos se emplean en sistemas ópticos muy variados, el almacenamiento holográfico de información es ya una realidad y la holografía aparece también en investigaciones de física fundamental como la teoría de la relatividad o la física cuántica.

Trascurridos sesenta años desde su invención, y a pesar de sus erráticos inicios, la holografía ha demostrado tener un gran pasado y un magnífico presente, pero desde luego lo innegable es que sigue teniendo un futuro prometedor [74].

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan Ramón Rivera, Vicerrector de Relaciones Institucionales de la Universidad de Alicante (UA) en el momento de la lectura de la lección inaugural, y al Servicio de Protocolo de la UA por el apoyo y colaboración prestados durante la preparación de la lección. También quiero agradecer a la Dra. Inmaculada Pascual, Catedrática de Óptica de la UA, el haber leído y corregido en más de una ocasión el manuscrito original, así como sus sugerencias y comentarios que indudablemente mejoraron el texto inicial de la lección. Finalmente agradezco al Dr. Sean F. Johnston de la Universidad de Glasgow el haberme enviado copia de varios de sus artículos relacionados con el origen y desarrollo de la holografía.

Referencias

- [1] E. Downing, *Holographic images – The intersection of art, science, and technology* (Spectrum MIT, 1999). Disponible en <http://web.mit.edu/giving/spectrum/winter99/holographic.html>.
- [2] M. Quintanilla, *Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza* **60**, 57 (2005).
- [3] G. Saxby, *Practical Holography* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 2004).
- [4] E. Hecht, *Óptica* (Addison Wesley, Madrid, 1999).
- [5] F.W.O. da Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 149 (2007).
- [6] A. Beléndez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 2601 (2008).
- [7] R.P. Crease, *El Prisma y el Péndulo: Los Diez Experimentos más Bellos de la Ciencia* (Crítica, Barcelona, 2006). En 2002 Robert P. Crease, historiador de la ciencia, preguntó a los lectores de la revista *Physics World*, donde escribe una columna, cuáles eran, en su opinión, los experimentos más bellos de la física. Para compilar la lista escogió los diez experimentos citados con más frecuencia. Tras publicarse el resultado en *Physics World* (<http://www.physicsworld.com/cws/article/print/9746>), saltó a las páginas de The New York Times. La belleza de estos experimentos radica, quizás, en que su denominador común es la máxima simplicidad de medios para su realización y la gran capacidad de cambiar el planteamiento dominante que ofrecieron sus conclusiones. El orden del resultado de la encuesta, por número de votos, fue el siguiente: *interferencia de los electrones al pasar por una doble rendija* (Bohr, De Broglie, Heisenberg y otros), *caída libre de los cuerpos* (Galileo), *determinación de la carga del electrón* (Millikan), *descomposición de la luz del Sol por un prisma* (Newton), *interferencia de la luz de la doble rendija* (Young), *medida de la constante de la gravitación universal con una balanza de torsión* (Cavendish), *medida de la circunferencia de la Tierra* (Eratóstenes), *caída de los cuerpos en planos inclinados* (Galileo), *descubrimiento del núcleo atómico* (Rutherford) y *movimiento de la Tierra* (el péndulo de Foucault). El experimento que quedó en el undécimo lugar fue el *principio de Arquímedes de la hidrostática*.
- [8] M. Lozano, *De Arquímedes a Einstein. Los Diez Experimentos más Bellos de la Física* (Debate, Barcelona, 2005).
- [9] C. Celestino y B. Arsioli, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 1602 (2008).
- [10] A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia, *Revista Española de Física* **5**, 40 (1991).
- [11] A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia, *Journal of the Optical Society of America A* **9**, 1214 (1992).
- [12] P. Hariharan, *Basics of Holography* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
- [13] N. Abramson, *The Making and Evaluation of Holograms* (Academia Press, Londres, 1981), p. 70.
- [14] E.N. Leith, *Proceedings of SPIE* **5005**, 431 (2003).
- [15] E.N. Leith, *Journal of Imaging Science and Technology* **41**, 201 (1997).
- [16] S.F. Johnston, *Proceedings of SPIE* **5005**, 455 (2003).
- [17] T.E. Allibone, *Journal of Electronics and Control* **4**, 179 (1958).
- [18] S.F. Johnston, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **36**, 35 (2005).
- [19] H. Kragh, *Generaciones Cuánticas. Una Historia de la Física del Siglo XX* (Ediciones Akal, Madrid, 2007).
- [20] S.F. Johnston, *Holographic Visions. A History of New Science* (Oxford University Press, Oxford 2006).
- [21] P.G. Tanner, T.E. Allibone y F. Eng, *Notes and Records of the Royal Society of London* **51**, 105 (1997).
- [22] D. Gabor, *Autobiography*. Disponible en <http://www.nobelprize.org>.
- [23] D. Gabor, *Holography, 1948-1971. Nobel Lecture, 1971*. Disponible en <http://www.nobelprize.org>.
- [24] D. Gabor, *Nature* **161**, 777 (1948).
- [25] P. Greguss, *Proceedings of SPIE* **4149**, 1 (2000).
- [26] Y.N. Denisyuk, *Leonardo* **25** 425 (1992).
- [27] Y.N. Denisyuk y V. Gurikov, *History and Technology* **8**, 127 (1992).
- [28] E.N. Leith, en *Trends in Optics*, editado por A. Conserntini (Academic Press, Nueva York, 1996), v. 3, p. 1-26.

- [29] K. Winick y R. Alferness, *Optics and Photonics News* **17**(4), 48 (2006).
- [30] P. Kirparick y H.M.A. El-Sum, *Journal of the Optical Society of America* **46**, 825 (1956).
- [31] E.N. Leith y J. Upatnieks, *Journal of the Optical Society of America* **52**, 1123 (1962).
- [32] E.N. Leith y J. Upatnieks, *Journal of the Optical Society of America* **53**, 1377 (1963).
- [33] S.F. Johnston, *History and Technology* **21**, 367 (2005).
- [34] G.V. Novotny, *Electronics* **37**(30), 86 (1964).
- [35] A. Beléndez, *Optica Pura y Aplicada* **40**, 281 (2007).
- [36] T. Pakula, *American Heritage of Invention & Technology* **18**, 12 (2003).
- [37] E.N. Leith y J. Upatnieks, *Journal of the Optical Society of America* **54**, 1295 (1964).
- [38] H.I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and Their Processing* (Springer-Verlag, Berlin, 1995).
- [39] S.F. Johnston, *Technology & Culture* **46**, 77 (2005).
- [40] G.W. Stroke, *An Introduction to Coherent Optics and Holography* (Academic Press, Nueva York, 1966).
- [41] S.F. Johnston, *History and Technology* **20**, 29 (2004).
- [42] R. Jackson, *Holosphere* **12**, 5 (1983).
- [43] S.F. Johnston, *Optics and Photonics News* **15**(7), 36 (2004).
- [44] S.F. Johnston, *Optics and Photonics News* **15**(8), 32 (2004).
- [45] S.A. Benton, *Journal of the Optical Society of America* **50**, 1545 (1969).
- [46] E. Ritscher, J. Reilly, J. Lambe y R. Macarthur (eds), *Light Dimensions. The Exhibition of the Evolution of Holography* (Ardentbrook, Londres, 1983), p.75.
- [47] K.A. Stetson y R.L. Powell, *Journal of the Optical Society of America* **55**, 1694 (1965).
- [48] A.A.V.V., *Holografía* (Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante, 1984).
- [49] C.S. Vikram, *Particle Field Holography* (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).
- [50] J.D. Trolinger, R.B. Lal, D. McIntosh y W.K. Withrow, *Applied Optics* **35**, 681 (1996).
- [51] I. Pascual, A. Beléndez y A. Fimia, *Applied Optics* **31**, 3312 (1992).
- [52] T. Huang, *Proceedings of the IEEE* **59**, 1335 (1971).
- [53] H.I. Bjelkhagen, en *Optical Imaging Sensors and Systems for Homeland Security Applications*, edited by B. Javidi (Springer-Verlag, Nueva York, 2006).
- [54] P. Aldhous, "Nature" **434**, 132 (2005).
- [55] B.P. Hildebrand, *Proceedings of SPIE* **532**, 63 (1983).
- [56] H.J. Coufal, D. Psaltis and G.T. Sincerbox (eds), *Holographic Data Storage* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- [57] M. Ortuño, S. Gallego, C. García, C. Neipp, A. Beléndez and I. Pascual, *Applied Physics B* **76**, 851 (2003).
- [58] A. Tonomura, *Electron Holography* (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- [59] H. Wilhelmsson, *Leonardo* **1**, 161 (1968).
- [60] H.Casdin-Silver, *Proceedings of the International Symposium on Display Holography*, edited by T.H. Jeong (Lake Forest College, Lake Forest, 1985), v. 2, p. 403-410.
- [61] H. Casdin-Silver, *Sculpture* **10**, 50 (1991).
- [62] H. Casdin-Silver, *Leonardo* **22**, 317 (1989).
- [63] M. Benyon, *Leonardo* **6**, 1 (1973).
- [64] M. Benyon y J. Webster, *Leonardo* **19**, 185 (1986).
- [65] M. Benyon, *Leonardo* **25**, 411 (1992).
- [66] C.F. Reuterswärd, *Leonardo* **22**, 343 (1989).
- [67] J. Oliva, *Holografía. Ciencia y Arte* (Ministerio de Cultura, Madrid, 1992). Texto realizado para la exposición Holografía, Ciencia y Arte realizada en Madrid de octubre a diciembre de 1992 con motivo de la capitalidad cultural europea de Madrid. Organizada por el Centro de Holografía de Alicante y cuyo comisario fue Justo Oliva, reunió en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología más de 150 obras, algunas de ellas de grandes dimensiones.
- [68] N. Torralba, *Holografía Artística: Holografía Creativa Española 1983-1993* (Instituto de Cultura "Juan Gil-Albert", Alicante, 1996).
- [69] S.C.M. Hui y H.F.O. Müller, *Architectural Science Review* **44**, 221 (2001).
- [70] [http://www.arch.hku.hk/\\$\sim\\$cmhui/holo/holo.html](http://www.arch.hku.hk/\simcmhui/holo/holo.html).
- [71] L.D. Siebert, *Proceedings of the IEEE* **56**, 1242 (1968).
- [72] H.I. Bjelkhagen, *Leonardo* **25**, 443 (1992).
- [73] H.I. Bjelkhagen, en *The Art and Science of Holography: A Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk*, edited by H.J. Caulfield, (SPIE Press, Bellingham, 2004).
- [74] J. Ludman, H.J. Caulfield y J. Riccobono, *Holography for the New Millenium* (Springer-Verlag, Nueva York, 2002).