

Universidad de Alicante

**Lección Inaugural
Curso Académico 2007-2008**

Holografía: ciencia, arte y tecnología



por
Augusto Beléndez Vázquez
Catedrático de Física Aplicada

28 de septiembre de 2007

LECCIÓN INAUGURAL

CURSO 2007 - 2008



UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Holografía: ciencia, arte y tecnología

AUGUSTO BELÉNDEZ VÁZQUEZ
CATEDRÁTICO DE FÍSICA APLICADA

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Escuela Politécnica Superior

Holografía: ciencia, arte y tecnología

AUGUSTO BELÉNDEZ VÁZQUEZ

Cuando se me comunicó que me correspondía impartir la lección inaugural del curso académico que ahora comienza, no dudé ni por un momento en aceptar el honor que esta tarea comporta. Ha sido grande la responsabilidad que he sentido al preparar esta lección, pero no ha sido menor la satisfacción personal que me ha supuesto este honroso encargo académico. Soy físico de formación y tanto mi actividad docente como mi actividad investigadora se desarrollan en el ámbito de la física. Esto hace, casi irremediabilmente, que el tema elegido tenga que estar relacionado con una ciencia tan fascinante y apasionante como es la física.

El azar ha querido que en este año 2007, declarado *Año de la Ciencia* por el Gobierno del Estado [1], haya recaído en un científico la responsabilidad de pronunciar esta lección inaugural y que el tema de la misma aborde aspectos de la ciencia, en este caso de la física. Con esta celebración se conmemora el centenario de la *Junta de Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas*, creada el 11 de enero de 1907, que ha sido definida como la mayor experiencia modernizadora de la ciencia española y a cuyo impulso se debe, en gran medida, el notable y sin precedentes desarrollo científico e innovador que tuvo lugar en nuestro país en las primeras décadas del pasado siglo [1]. Se ha aprovechado esta efeméride para acercar la ciencia a la sociedad y poner las bases para una mejora de la cultura científica de la ciudadanía de modo que la sociedad sea consciente de la importancia de la ciencia y la tecnología en el desarrollo social y económico

del país [2]. Este año es, por tanto, muy especial para todos los que trabajamos en la generación y la transmisión del conocimiento científico. Para quienes queremos conocer mejor nuestro mundo y contribuir a mejorarlo. Para quienes apoyamos y apostamos por la ciencia. Porque respaldar la ciencia es defender la curiosidad, la racionalidad, la cultura, el sentido crítico, el descubrimiento, la constancia así como apostar por una manera de reaccionar ante los retos de nuestra existencia más libre. Nuestro país necesita más ciencia, más investigadoras e investigadores, más descubrimientos, pero también mayor conocimiento, cultura, actitud científica y, sobre todo, un decidido apoyo no sólo de los responsables políticos sino de toda la sociedad [1], la cual debe ser consciente que nadie es ajeno a la ciencia, y menos en un mundo como el actual, dominado en buena medida por la ciencia y la tecnología. En el excelente marco que supone esta celebración, deseo que esta lección inaugural sea mi humilde contribución a esta efeméride.

Es conocido que en las universidades de la Europa Medieval, las asignaturas se dividían en dos grandes grupos: el denominado *trivium* (la gramática, la retórica y la dialéctica) y el *quadrivium* (la aritmética, la geometría, la música y la astronomía), división que pretendía abarcar todo el saber del momento [3]. Estas siete asignaturas eran conocidas como *Las siete artes liberales* y están en el origen de lo que el químico-físico, novelista y ensayista inglés Charles Percy Snow denominó las “dos culturas”, las humanidades y las ciencias [4], para significar el cisma existente entre

Holografía: ciencia, arte y tecnología

los intelectuales literarios y los científicos [5]. Aunque el sistema educativo actual intenta que no haya que elegir entre una de estas “dos culturas”, desgraciadamente, y en muchas ocasiones, todavía se pretende hacer ver que en el mundo científico y técnico no son necesarias las artes o las letras, o que en el mundo humanista no cabe la ciencia, no es necesaria para el espíritu humano. También en el seno del mundo científico empiezan a existir, a su vez, otras dos culturas no sólo bien diferenciadas, sino además, y en ciertas ocasiones, antagónicas: la ciencia pura y la ciencia aplicada. Por lo que se podría hablar de “tres culturas”: artística, científica y tecnológica. Si bien la ciencia y la tecnología tienen elementos comunes, sus fines, objetivos y métodos de trabajo son en muchos casos distintos y claramente diferenciados [4]. Sin embargo, ambas se necesitan. La ciencia sin la técnica es difícil de concebir y mucho más difícil en estos momentos en los que los grandes experimentos científicos tienen una gran complejidad técnica. Asimismo, la ciencia es fundamental para la técnica y en particular nadie dudaría hoy día que la física es el substrato de la mayor parte de las tecnologías modernas, tanto de las actualmente en utilización como de las venideras. Puedo afirmar, sin equivocarme, que el papel de la física en el desarrollo tecnológico ha sido y es decisivo.

En relación al tema escogido para esta lección inaugural, he de decir que no me resultó difícil decidirme. Dentro de mi área, la física, podría haber elegido una serie de temas muy diversos, muchos de ellos de gran actualidad y quizás para algunos de mayor interés e importancia. Sin embargo, para esta oportunidad única me he inclinado por la elección de un tema relacionado con una parte de la óptica y en el que se desarrolla mi actividad investigadora desde hace más de veinte años: la holografía. Ésta ha sido, sin duda, la razón fundamental de mi elección, pero han existido otras que no quisiera dejar de mencionar.

La holografía ha estado ligada a la Universidad de Alicante desde sus comienzos y es una de las líneas de investigación más antiguas

de entre las que se desarrollan en la misma. Además, el origen de la holografía en España tuvo lugar en Alicante a finales de la década de 1960 con la creación del Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante (entonces Colegio Universitario) en 1968 [6-9]. En este Laboratorio, dirigido en sus comienzos por el Profesor Justo Oliva, se llevaron a cabo las primeras investigaciones sobre holografía en España y el primer holograma de nuestro país lo realizó en Alicante nuestro compañero José Antonio Quintana en 1969 [9]. En 1979 se celebra en Madrid la primera exposición de holografía de España organizada desde el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante y el Departamento de Óptica de la Universidad de Valencia, y desde entonces son varias las exposiciones en las que participa el Laboratorio de Óptica. Entre 1984 y 1989, y organizada desde el recién creado *Centro de Holografía* de la Universidad de Alicante [8], se realizó la muestra itinerante *¿Qué es holografía?*, que tuve la suerte de admirar en enero de 1987 en el magnífico entorno del claustro de la Iglesia de la Asunción de Albacete. Estas exposiciones fueron un hito importante tanto en la trayectoria de este grupo de investigación de la Universidad de Alicante, como en la difusión de la holografía a lo largo y ancho de la geografía española. En 1986 comenzaron los cursos de *Iniciación a la holografía* que se prolongaron hasta los primeros años de la década de 1990. Con un cierto “carácter iniciático”, a ellos asistieron no sólo científicos e ingenieros sino casi la práctica totalidad de los “hológrafos” españoles [7].

Con el paso de los años nos fuimos incorporando más investigadores y del equipo inicial de personas surgieron nuevos grupos que actualmente continúan llevando a cabo distintas investigaciones en el campo de la holografía en la Escuela Politécnica Superior, la Escuela de Óptica y Optometría y la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alicante, así como en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Miguel Hernández.

Al elegir la holografía como tema de esta lección inaugural en este acto de apertura,

estoy abordando un campo de investigación al que ha contribuido y sigue contribuyendo de forma notable nuestra Universidad. En varios libros sobre holografía [10-17], algunos de ellos considerados ya como “clásicos”, se presentan resultados obtenidos en la Universidad de Alicante y en algunos además de incluir el nombre de los investigadores, aparece explícitamente el nombre de nuestra Universidad [14] al referirse a algunas contribuciones sobre materiales de registro holográfico. Sirva también como muestra que en el número especial *Progress in Holography* de la revista *Journal of the Optical Society of America A* publicado en 1992 para celebrar el cuarenta y cinco aniversario de la invención de la holografía hay un artículo de la Universidad de Alicante [18] junto con otros de autores como Lohmann, Denisyuk o Leith, cuyos nombres se mencionarán en más de una ocasión a lo largo de esta lección al tratarse de protagonistas en la historia del origen y posterior desarrollo de la holografía. Por último, y como una prueba más de las contribuciones de nuestra Universidad en el campo de la holografía, en una publicación americana de 1996 titulada *Selected Papers in Holographic Recording Materials* [19] que incluye una selección de los artículos sobre materiales de registro holográfico más representativos publicados en todo el mundo entre 1962 y 1995, cinco de los cien artículos incluidos han sido realizados en la Universidad de Alicante.

Quiero, por tanto, que esta lección inaugural sirva también de homenaje a todos aquellos pioneros de la holografía en nuestra Universidad, que lo fueron también en toda España.

Deseo, por último, justificar la inclusión del texto “ciencia, arte y tecnología” en el título de la lección. Ésta no ha sido, desde luego, arbitraria y además guarda relación con las “tres culturas” a las que me he referido con anterioridad. Stephen Benton, uno de los pioneros de la holografía, señaló en más de una ocasión que “es la intersección de arte, ciencia y tecnología lo que hace la holografía tan interesante” [20]. Lo cierto es que, junto

con innumerables aplicaciones tecnológicas, la holografía es uno de los pocos campos científicos que ha proporcionado un medio para el arte. Además, por su desarrollo y aplicaciones, ha llegado a ser una de las ramas más importantes de la óptica moderna. Ha dado lugar a un gran número de aplicaciones y ha proporcionado técnicas que pueden utilizarse casi en cualquier área de investigación pura o aplicada. Por ello, es complicado hallar un campo científico o técnico en el que no puedan aplicarse métodos holográficos y, de hecho, es difícil encontrar una actividad de investigación en la que no se utilicen técnicas holográficas para algunos de sus desarrollos, incluyendo áreas aparentemente tan alejadas como la arqueología o la paleontología.

Aunque 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, hay otras muchas aplicaciones en ámbitos muy diferentes [21]. La interferometría holográfica, los elementos ópticos holográficos, las memorias holográficas, el procesado óptico de información, los hologramas generados por ordenador, la holografía digital, los hologramas de seguridad, la litografía holográfica, la holografía solar o la holografía cuántica son sólo algunas de las múltiples aplicaciones científicas y técnicas basadas en el método holográfico. Además, hoy en día la holografía no sólo se limita al espectro visible, sino que pueden hacerse hologramas utilizando ondas de otras regiones del espectro electromagnético y se habla así de holografía infrarroja, ultravioleta, de microondas o de rayos X. Existe la holografía acústica, la holografía de electrones o la holografía de neutrones que permite, por ejemplo, obtener imágenes holográficas de átomos utilizando neutrones térmicos. También se han desarrollado numerosas aplicaciones 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 de Einstein y existe un concepto denominado “universo holográfico”

Holografía: ciencia, arte y tecnología

relacionado con los agujeros negros y la cosmología. En resumen, además de en 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.

La holografía, por tanto, abarca áreas de investigación muy amplias, a la vez que muy distintas, por lo que resulta imposible abordar todas ellas en esta lección inaugural. Por esta razón, he optado por centrar el contenido de la misma sólo en los siguientes aspectos. Primeramente, presentaré sus fundamentos físicos, la interferencia y la difracción. A continuación, comentaré brevemente los procesos involucrados en el registro y la reconstrucción de un holograma. Por último, me referiré a los orígenes y posterior desarrollo de la holografía, incidiendo tanto en la forma en que sus tres principales protagonistas, Gabor, Denisyuk y Leith, pusieron los cimientos sobre los que comenzó a edificarse la holografía, así como en las posibilidades de la misma en diversas parcelas de la ciencia, el arte y la tecnología.

1. Interferencia y difracción

Para un físico un holograma es el registro de la interacción de dos ondas coherentes en la forma de un patrón microscópico de franjas interferenciales. Para un lego en física, pero bien informado, es una película fotográfica o placa que ha sido expuesta a la luz del láser y procesada de tal modo que al ser iluminada de forma conveniente produce una imagen tridimensional. Para alguien menos informado es sólo algún tipo de fotografía tridimensional [14]. Ciertamente, tanto la fotografía como la holografía utilizan una película fotográfica u otro medio fotosensible, pero eso es quizás todo lo que tienen en común. Cada una de ellas produce la imagen de un modo completamente diferente, no siendo posible describir en los mismos términos la manera en que se forman

los dos tipos de imágenes, la fotográfica y la holográfica. Resulta sencillo mostrar como la lente del objetivo de una cámara fotográfica forma la imagen de un objeto sobre la película sin más que utilizar un simple trazado de rayos y conceptos básicos de óptica geométrica. Sin embargo, para explicar la formación de la imagen holográfica es necesario recurrir a los conceptos de interferencia y difracción, ambos característicos de los fenómenos ondulatorios [22]. De forma simplificada, la realización de un holograma requiere del registro y la reconstrucción de ondas luminosas, y puede decirse que un holograma contiene el registro codificado de una onda objeto [23]. En la etapa de registro se produce la interferencia de la onda objeto con una onda de referencia conocida, mientras que en la etapa de reconstrucción se ilumina el holograma con una onda análoga a la de referencia que, al ser difractada por el holograma, de éste emerge una onda imagen similar a la onda objeto original. Los fenómenos físicos básicos en los que se basa la holografía son, pues, la interferencia y la difracción, propios de las ondas, tanto si se trata de ondas sonoras, superficiales en un líquido, sísmicas o electromagnéticas.

Es obvio, por tanto, que los fundamentos físicos sobre los que se sustenta la holografía se encuentran en la naturaleza ondulatoria de la luz, demostrada de forma convincente hacia 1801 por un médico inglés llamado Thomas Young (1773-1829) (Figura 1) con uno de los “experimentos más bellos de la física” [24], el de la doble rendija. Paradójicamente, Young era mucho más popular por descifrar los jeroglíficos egipcios de la *pedra Rosetta* que por desentrañar la naturaleza de la luz [25]. Su mente independiente y tenaz le ayudó a probar la naturaleza *ondulatoria* de la luz en contraposición a la naturaleza *corpúscular*, promovida nada más y nada menos que por Isaac Newton (1642-1727).



Figura 1. Thomas Young (1773-1829).

Eran dos las teorías sobre la naturaleza de la luz que coexistieron desde el siglo XVII: la teoría corpuscular, defendida por Newton, y la teoría ondulatoria, avalada por Christian Huygens (1629-1695) (Figura 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 físicos, fundamentalmente 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 [22].



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 llamado *principio de interferencia* [26]. 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 el primer experimento en el que se demuestra que la superposición de luz puede producir oscuridad. Este fenómeno se conoce como interferencia (Figura 3) y con este experimento se corroboraron las ideas intuitivas de Huygens respecto al carácter ondulatorio de la luz.

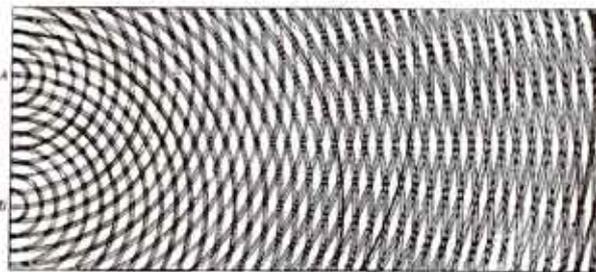


Figura 3. Diagrama de Young de un patrón de interferencia producido por una serie de ondas procedentes de dos fuentes distintas [24].

Para que se produzcan interferencias es necesario que la luz sea coherente, tanto espacialmente, fuente puntual, como temporalmente, fuente monocromática. Además las ondas que interfieren tienen que mantener una diferencia de fase constante. 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.

Del mismo modo que Young es el responsable del resurgimiento de la teoría ondulatoria de la luz en Inglaterra gracias a sus experimentos sobre interferencias con ondas luminosas, Augustin Jean Fresnel (1778-1827) (Figura 4) comenzó a revivir de manera

brillante la teoría ondulatoria en Francia, ajeno en un principio a los esfuerzos 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, característico del movimiento ondulatorio, que se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo. Éste puede ser una pantalla con una pequeña abertura, una ranura que sólo permite el paso de una pequeña fracción de la onda incidente o un objeto pequeño que bloquea el paso de una parte del frente de onda. En realidad no hay distinción física significativa entre interferencia y difracción, pero es algo común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se analiza la superposición de solamente unas pocas ondas y de difracción cuando se trata de un gran número de ondas [22]. A pesar de ello, es habitual referirse, por ejemplo, a la interferencia de haces múltiples en un contexto y a la difracción por una red en otro. El principio de Huygens-Fresnel permite calcular los patrones de difracción generados por obstáculos y aberturas y explicar de forma satisfactoria la propagación rectilínea en medios homogéneos, eliminando así la objeción principal de Newton para la teoría ondulatoria. Puede decirse que este principio lleva a la siguiente conclusión: “la luz se difracta y la interferencia está en el corazón del proceso” [22].



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

2. La técnica holográfica

La fotografía permite almacenar imágenes sobre una superficie de material sensible a la luz y está basada en el principio de la cámara oscura, en la cual se consigue enfocar sobre una superficie la imagen bidimensional de un objeto tridimensional captada por una lente o un conjunto de lentes (Figura 5). Para registrar esta imagen las cámaras fotográficas utilizaban hasta hace algunos años exclusivamente emulsiones fotosensibles, aunque en la actualidad se emplean sobre todo sensores digitales.

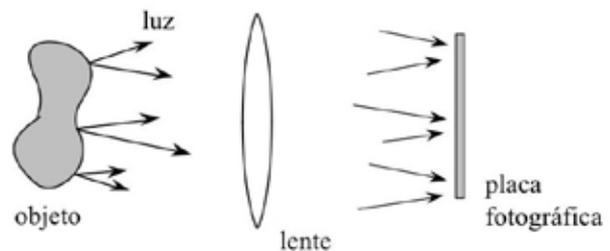


Figura 5. Fotografía de un objeto.

Las primeras imágenes fotográficas de la historia fueron realizadas por Joseph-Nicéphore Niépce (1765-1833) en el año 1816, aunque fue Louis Daguerre (1787-1851) el que a partir de 1839 perfeccionó el método de Niépce. Como la técnica fotográfica se conoce desde hace tanto tiempo, se está acostumbrado a ver 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. Todos ellos comparten la limitación de ser sólo representaciones de la intensidad de las ondas luminosas. Dicho de otro modo, cuando la imagen de una escena se reproduce mediante una fotografía, lo que finalmente se observa no es una reproducción precisa de la onda luminosa que inundaba al objeto, caracterizada por su amplitud y su fase, sino más bien un registro punto a punto del cuadrado de la amplitud de esta onda. La luz que se refleja en una fotografía lleva consigo información acerca de la amplitud pero nada acerca de la fase de la onda que provenía del objeto original. Sin embargo, si tanto la amplitud como la fase de la onda original se

podrían reconstruir de algún modo, la onda resultante no se distinguiría de la original. Dicho con otras palabras, cuando observamos 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. Entonces seríamos capaces de ver la imagen formada en una tridimensionalidad perfecta, exactamente como si el objeto estuviera realmente ante nosotros.

Esto es lo que puede conseguirse mediante la holografía, método que permite obtener imágenes tridimensionales y que consta de dos etapas denominadas registro y reconstrucción. Mediante el proceso de registro se almacena en determinados materiales fotosensibles, 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 [16]. Una diferencia fundamental con la fotografía es que ahora 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”. Un holograma es ciertamente como una “ventana con memoria” [27].

En la etapa de registro se hace interferir la onda emitida o difundida por un objeto con una onda de referencia conocida (Figura 6). El “código holográfico” consiste en “mezclar” la onda objeto con la onda de referencia y registrar su patrón interferencial en un material fotosensible como puede ser 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.

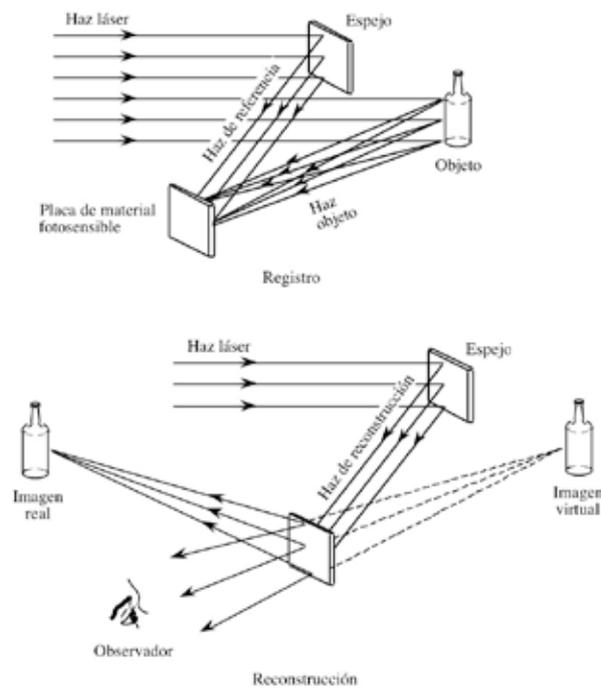


Figura 6. Registro y reconstrucción de un holograma.

Al hablar del proceso holográfico se ha mencionado el registro de la interferencia de dos ondas por lo que se tendrán que satisfacer las condiciones de coherencia necesarias para la formación de franjas de interferencia [26]. Además, el poder de resolución del material fotosensible utilizado debe ser elevado, pues las franjas de interferencia suelen tener separaciones de la milésima parte de un milímetro. Estos órdenes de magnitud exigen una gran estabilidad y una ausencia total de

movimientos y vibraciones de los elementos que intervienen en la formación del holograma. Todos estos requisitos han condicionado los avances de la holografía a la aparición de fuentes de luz suficientemente coherentes y a la obtención de nuevos materiales de registro para la fabricación de hologramas [19]. El desarrollo del láser a partir de 1960 resolvió la primera de estas dificultades, mientras que la segunda se fue superando con la utilización de emulsiones fotográficas, fotorresinas, gelatinas dicromatadas, fototermoplásticos, fotopolímeros y otros materiales fotosensibles aptos para el registro de hologramas. Todo ello ha dado lugar al desarrollo de la holografía y de sus innumerables aplicaciones. Pero no adelantemos acontecimientos y centrémonos en primer lugar en ver dónde y de qué modo comenzó todo.

3. “Orígenes” y desarrollo 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. Se comprobará a continuación como 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 [28-30]. El primero, Dennis Gabor (1900-1979), un ingeniero húngaro afincado en Inglaterra, fue el que tuvo la idea original, el inventor de la técnica holográfica que él 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, como se dice en inglés, un *white elephant* [31, 32], un *elefante blanco*, un objeto superfluo, 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. Tres fueron también 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 del estado en lo que era entonces Leningrado, en la antigua Unión Soviética; y un laboratorio de investigación clasificado de la Universidad de Michigan que trabajaba 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 ya que 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 mencionaré que Maiman envió un artículo a una de las revistas de física más prestigiosas, el *Physical Review*. Sin embargo, sorprendentemente el editor rechazó el artículo. Por esta razón, el primer anuncio del láser apareció en la revista británica *Nature* en 1960, revista que junto a la estadounidense *Science*, ha sido galardonada con el *Premio Príncipe de Asturias de Comunicación y Humanidades* de este año 2007. 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 [33]. Alrededor de 1950, precisamente en la época en que Gabor inició sus trabajos sobre *reconstrucción del frente de onda*, 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.

Gabor y la “reconstrucción del frente de onda”

Dennis Gabor (Figura 7) nació el 5 de junio de 1900 en Budapest, Hungría. De ascendencia judía, su familia paterna provenía de Rusia mientras que su familia materna de España [34, 35], posiblemente de una familia de judíos sefardíes llegados a Hungría en el siglo XVIII. Julio Verne y, quizás el más grande de todos los inventores, Thomas Edison, eran sus ídolos en su niñez, mientras que su padre, un industrial y Director de la Compañía General Húngara de Minas de Carbón fue quien introdujo la ingeniería y la ciencia en el hogar familiar, proporcionando a sus hijos más conocimientos de física y matemáticas que sus propios profesores [13]. También a través de su familia, además de húngaro, Gabor aprendió alemán, inglés y francés.



Figura 7. Dennis Gabor (1900-1979) (AIP Emilio Segré Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates).

En octubre de 1910, con apenas diez años de edad, Dennis Gabor presentó el impreso de solicitud de la primera de un total de sesenta y tres patentes de invención realizadas a lo largo de su vida [36]. Ese año, mientras paseaba por el parque de la ciudad, el niño Dennis se fijó en un tiovivo o carrusel de feria en el que los

caballitos que subían y bajaban en las barras verticales se habían sustituido por pequeños avioncitos, tan de moda en esa época tras los vuelos de los hermanos Wright. Cuando un avión real sobrevoló el parque decidió poner en común ambos sistemas, de modo que diseñó un nuevo tiovivo en el que los pequeños avioncitos no sólo parecían aviones, sino que también actuaban como tales, ya que disponían de un motor eléctrico y, mediante una serie de correas ajustables, podían cambiar de altura conforme giraban en torno a un eje central [37]. Su padre le ayudó a poner los planos en orden y los presentó en la Oficina de Patentes de Hungría (Figura 8). El 14 de noviembre de 1911, a la edad de once años, le concedieron su primera patente, la número 54.703, por su tiovivo de aeroplanos.

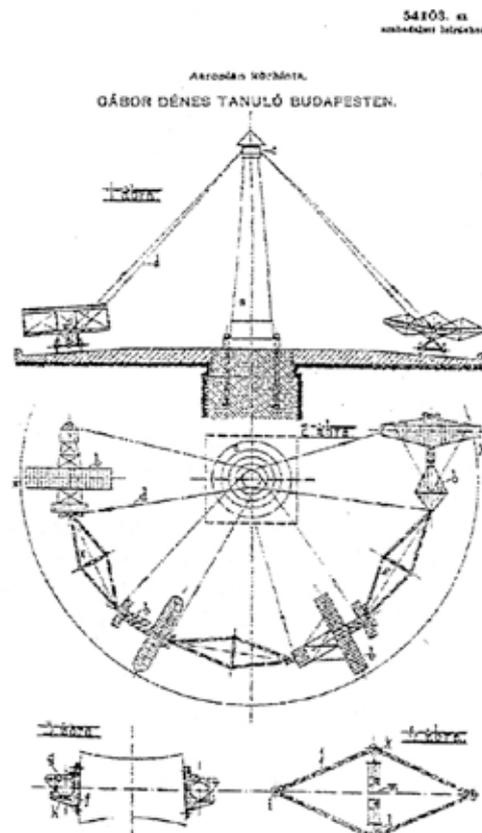


Figura 8. Patente del tiovivo de aeroplanos (Gabor, 1910) (P. Greguss, “Dennis Gabor – Inventor of ...”, *Proc. SPIE*, Vol. 4149, 1-11, 2000).

Aunque la física fascinaba al joven Gabor, decidió estudiar ingeniería. Más tarde escribió, “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?” [38]. Al cumplir los dieciocho años fue enviado al norte de Italia para servir en la artillería austro-húngara en los últimos meses de la Primera Guerra Mundial, pero tuvo suerte ya que el armisticio no tardó en firmarse, por lo que regresó e inició los estudios de ingeniería mecánica en la Universidad Politécnica de Budapest. A finales de 1918 una revolución democrática-burguesa declaró la república independiente de Hungría, que al año siguiente cayó bajo influencia rusa. Gabor era opuesto a este gobierno que consideraba reaccionario y al ser llamado en 1920 a realizar el servicio militar abandonó Hungría para continuar sus estudios en Berlín, pero ahora de ingeniería eléctrica. A finales de 1923 obtuvo el Diploma en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Berlín, donde la física se encontraba en un momento de gran apogeo con físicos como Einstein, Planck, Nerst y von Laue. El propio Gabor señala en su autobiografía redactada con ocasión de la concesión del Premio Nobel que, aunque la ingeniería eléctrica era su profesión, su trabajo estaba casi siempre relacionado con la física aplicada [38]. De los años de estudiante en Berlín guardaba un gran recuerdo de los coloquios de física de los martes y del inolvidable seminario sobre mecánica estadística impartido por Albert Einstein durante 1921 y 1922. En 1927 obtuvo el título de doctor ingeniero bajo la dirección del gran ingeniero Matthias. Su tesis doctoral consistía en la construcción de un tipo de oscilógrafo de rayos catódicos. Finalizada su tesis entró a trabajar en la *Siemens & Halske AG* de Berlín, en uno de sus laboratorios de física, para desarrollar lámparas de alta presión de vapor de mercurio y de vapor de cadmio. En esta empresa comenzó a desarrollar algunos de sus múltiples inventos. Como prueba de su fructífera labor como inventor ya se ha señalado que realizó 62 patentes entre 1928 y 1971 [36], además de la ya mencionada de 1910 [37].

Dennis Gabor forma parte de una emigración de húngaros brillantes, todos

nacidos entre 1879 y 1908 [13]. Entre los húngaros notables de esa generación se encontraban, además de Gabor, el biofísico Georg von Békésy (1899-1972) –Premio Nobel de 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 (1898-1964), 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, Gabor abandonó Alemania pues debido a su origen judío no le fue renovado su contrato con la compañía Siemens y, tras una breve estancia en Budapest, marchó a Inglaterra en 1934. Aunque resultaba difícil a los extranjeros encontrar empleo en Inglaterra, todavía sumida en las consecuencias de la crisis económica de 1929, gracias a la inestimable ayuda de su *amigo de toda la vida*, Edward Allibone (1903-2003) [34], obtuvo un empleo en la *British Thomson Houston Company* donde comenzó a desarrollar varios inventos, entre ellos algunos relacionados con tubos de descarga de gas. 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 clasificado por el gobierno británico como *enemigo extranjero* y excluido de dichas investigaciones. Sin embargo, podía seguir trabajando fuera de la zona de seguridad de la empresa. Tras la Segunda Guerra Mundial, Gabor publicó sus primeros artículos sobre teoría de la comunicación, desarrolló un sistema de cinematografía estereoscópica y comenzó a realizar los primeros experimentos sobre holografía. En enero de 1949 entró en el *Imperial College of Science and Technology* de Londres, donde permaneció hasta su jubilación en 1967. Gabor aunó las “tres culturas” antes mencionadas en una sola. A lo largo de su vida siempre insistía que él era ingeniero e inventor, en vez de científico [39]. Es cierto

que era ingeniero tanto por formación como de profesión, con numerosos inventos a lo largo de su vida. Pero no es menos cierto que fue un científico con trabajos tanto de ciencia pura como aplicada, con estudios pioneros sobre teoría de la comunicación o trabajos experimentales sobre las oscilaciones en plasmas. Pero Gabor también fue un humanista en el más puro sentido del Renacimiento [13], lector voraz, escritor y ensayista, hombre preocupado por la sociedad tecnológica de finales del siglo XX [40] y miembro del *Club de Roma*, un grupo de científicos, industriales y humanistas formado para estudiar el futuro de la humanidad. Desde 1958 dedicó gran parte de su tiempo al estudio del futuro de nuestra civilización industrial sobre el que publicó, entre otros, el libro *Inventando el futuro* en el que señalaba “tú no puedes predecir el futuro, pero puedes inventarlo” [41]. Después de 1962, cuando Leith y Upatnieks aplicaron los láseres a la holografía, el lugar de Gabor en la historia estaba asegurado y en 1971 recibió el Premio Nobel de Física [42]. Dennis Gabor falleció el 8 de febrero de 1979.

Pero volvamos al año 1947 en el que la holografía comienza su andadura en un laboratorio de la *British Thomson-Houston Company*, donde Gabor estaba trabajando en la mejora del microscopio electrónico. 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 [21]. Esta limitación estaba relacionada con la aberración esférica de las lentes magnéticas del microscopio. Para resolver este problema, inherente a las características de los objetivos del microscopio electrónico, 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?” [43]. La contestación a esta pregunta se le ocurrió

mientras esperaba para jugar un partido de tenis el Domingo de Pascua de 1947 [13] 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, al difractarse por el holograma, reconstruiría el frente de onda original y lo podría corregir para obtener una buena imagen. Evidentemente, para conseguir franjas de interferencia contrastadas era necesario disponer de una fuente de iluminación de gran coherencia, la cual no existía en aquellos años. En cualquier caso, y a pesar de no tener mucha experiencia previa de trabajo con la instrumentación propia de un laboratorio de óptica, Gabor realizó en 1948 el primer holograma utilizando tanto en el registro como en la reconstrucción luz filtrada proveniente de una lámpara de arco de vapor de mercurio, que constituía una de las mejores fuentes de luz coherente antes del láser. Los objetos eran bastante sencillos: unas diapositivas con rótulos opacos con letras y sin escala de grises. Una parte de la luz incidente se hacía pasar por superficies abiertas, relativamente amplias, y servía de haz de referencia. La luz se difractaba o dispersaba en las proximidades de las líneas oscuras que formaban las letras, esparciéndose hasta hacerlas irreconocibles en el plano donde se grababa el holograma. Estos hologramas no resultan impresionantes vistos ahora, pero constituyeron una demostración convincente de un nuevo e interesante principio de la óptica por el que Gabor recibió el Premio Nobel. El objeto para el primer holograma era una diapositiva transparente circular de 1.4 mm de diámetro y contenía el nombre de tres físicos a quienes Gabor consideraba importantes por haber puesto las bases de su técnica de reconstrucción del

Holografía: ciencia, arte y tecnología

frente de onda: Huygens, Young y Fresnel. Los resultados fueron presentados en Londres en una conferencia sobre microscopía electrónica en abril de 1948 (Figura 9) y publicados en la revista *Nature* mediante un breve artículo de apenas dos páginas titulado *A new microscopic principle* [44].



Figura 9. Póster de la conferencia de Gabor de 1948 (*The MIT Museum – Holography Collection from the Museum of Holography*).

Poco después presentó un trabajo más extenso, de treinta y tres páginas, ante la *Royal Society* de Londres en el que señalaba: “el nombre ‘holograma’ no es injustificado, al ser la fotografía que contiene la información total necesaria para reconstruir el objeto, que puede ser bidimensional o tridimensional” [45]. En el holograma presentado en este último artículo había incluido los nombres de otros físicos famosos: Newton, Faraday, Maxwell, Kirchhoff, Planck, Einstein y Bohr (Figura 10). En septiembre de ese mismo año, el *New York Times* publicó la primera noticia sobre esta nueva técnica, mientras que en diciembre de 1948 Gabor presentó una patente relacionada con la mejora de imagen en microscopía electrónica (Figura 11) [37].



Figura 10. Otro ejemplo de los primeros hologramas de Gabor (M. Born y E. Wolf, *Principles of Optics*, 7ª edición, Pergamon Press, Londres, 1999. Figura cortesía de Emil Wolf).

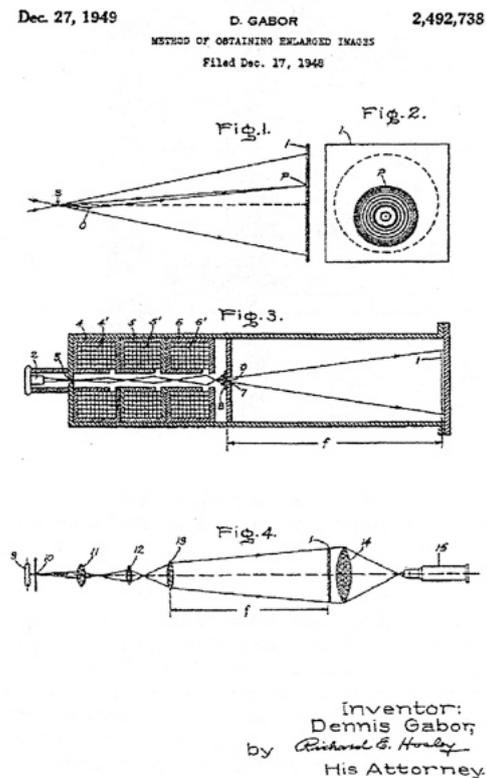


Figura 11. Patente sobre la mejora de la resolución del microscopio electrónico (P. Greguss, “Dennis Gabor – Inventor of ...”, *Proc. SPIE*, Vol. 4149, 1-11, 2000).

Gabor consiguió en 1949 un puesto de profesor de Electrónica en el *Imperial College of Science and Technology* de Londres, sobre todo gracias a la buena acogida que tubo su idea de la *reconstrucción del frente de onda* entre científicos como Sir Lawrence Bragg y Max Born, ambos Premios Nobel de Física, y Sir Charles Darwin, nieto del evolucionista y Director del Laboratorio Nacional de Física de Gran Bretaña [30]. En los años siguientes la técnica fue estudiada por unos pocos investigadores además de Gabor, entre ellos se encontraban Gordon Rogers (1916-), un antiguo estudiante de doctorado de Sir 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 realizó la primera tesis doctoral en holografía titulada *Reconstructed Wave-Front Microscopy* que presentó en la Universidad de Stanford en 1952. Sin embargo, sólo se consiguieron imágenes pequeñas y borrosas y en muchas ocasiones con apenas unas pocas franjas de interferencia. Hacia 1954 Gabor estaba frustrado hasta el punto de la desesperación, intentando, sin mucho éxito, convencer a sus colaboradores que continuaran con las investigaciones. Sin embargo, todos ellos habían perdido el interés por dos razones importantes relacionadas con la imposibilidad de obtener resultados óptimos cuando aplicaban el método al microscopio electrónico, y con la segunda etapa del proceso, la reconstrucción óptica del holograma que era imperfecta. El método de Gabor generaba un *holograma en eje*, también conocido como *holograma de Gabor*. La calidad de la imagen de estos hologramas era bastante pobre. Un problema básico era que al reconstruir el holograma se forman dos ondas, una divergente, análoga a la onda objeto que forma una imagen detrás del holograma, la denominada *imagen virtual*, y una convergente que forma una imagen delante del holograma, la llamada *imagen real*. Puede contemplarse la

imagen virtual o la imagen real, pero siempre con la otra desenfocada como fondo. También se presentan otros defectos que introducen componentes adicionales de luz extraña.

Entre 1948 y 1955 se publicaron alrededor de cincuenta artículos sobre lo que Gabor denominó método de *reconstrucción del frente de onda* y hacia 1955, tras investigar varios montajes ópticos para minimizar el efecto de la imagen conjugada, Gabor abandonó tranquilamente sus investigaciones. En 1956, y en una carta dirigida a Albert Baez, Gordon Rogers, quizás el más entusiasta de los que se habían dedicado a investigar sobre el método inventado por Gabor, escribía: “por lo que a mí respecta, estoy feliz de dejar que la microscopía por reconstrucción del frente de onda muera de forma natural; le veo relativamente poco futuro y estoy deseando dedicarme a otra cosa” [46]. Sus colaboradores, incluido su íntimo amigo Allibone, calificaron la microscopía por reconstrucción del frente de onda como un *elefante blanco* [31], no teniendo, como algunos de sus inventos anteriores, ninguna perspectiva comercial. Hasta tal punto pensaba Gabor que no era un tema importante que en 1958, cuando se presentó a un puesto de *professor*, el equivalente a catedrático en la universidad española, en el *Imperial College* de Londres, apenas hizo mención a su trabajo sobre la reconstrucción del frente de onda [30]. En su autobiografía [8] Gabor señala que su invención de la holografía había sido un ejercicio de lo que en inglés se denomina *serendipity*, es decir, “el 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 [47].

Denisyuk y la “fotografía de ondas”

En 1958 los investigadores que habían iniciado los primeros trabajos sobre la *reconstrucción del frente de onda* la habían abandonado completamente y cambiado su campo de investigación. Dennis 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. El equipo de la compañía británica de ingeniería eléctrica en la que Gabor realizó los primeros experimentos sobre holografía estaba ahora centrado en la mejora del diseño de sus microscopios electrónicos comerciales. Paul Kirkpatrick trabajaba en reflectores para telescopios de rayos X, Albert Baez y Gordon Rogers estaban centrados en su labor académica como profesores, por lo que no disponían de mucho tiempo, e incluso interés, para los problemas de los hologramas, mientras que Adolf Lohmann estaba dedicado a la formulación matemática de ciertos problemas relacionados con el procesado óptico de la información. Sin embargo, aproximadamente por esas fechas el concepto de *reconstrucción del frente de onda* estaba siendo reinventado en un contexto diferente. Un investigador que trabajaba de forma aislada estaba realizando una serie de estudios similares en el centro de investigación óptica más importante de la antigua Unión Soviética. Su nombre era Yuri Denisyuk (1927-2006) (Figura 12), científico del Instituto Estatal de Óptica Vavilov de Leningrado, quién inició la segunda investigación sobre holografía hacia 1958 [13]. Denisyuk desconocía el trabajo de Gabor, no sólo porque como se ha señalado, salvo al principio, su éxito y difusión fueron muy limitados, sino porque era el periodo de la guerra fría y la transferencia de información, sobre todo científica, entre los dos grandes bloques, el este y el oeste, era prácticamente inexistente.



Figura 12. 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).

Denisyuk nació en Stotchi, en el Mar Negro, pero creció y estudió en Leningrado. En sus años en el colegio su sueño era trabajar en campos de la física fundamental como la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad, las cuáles atraían a los jóvenes de su tiempo [48]. Sin embargo, tuvo que cambiar de planes y se licenció en el Departamento de Ingeniería Física del Instituto de Mecánica de Precisión y Óptica de Leningrado en 1954. Ese año, y bajo la supervisión de Alexander Elkin, comenzó a trabajar en el campo de la instrumentación óptica en el Instituto Estatal de Óptica Vavilov, en lo que él consideraba un trabajo aburrido relacionado con el desarrollo de dispositivos ópticos convencionales para la armada soviética. Denisyuk decidió doctorarse y desde 1958, Elkin le permitió dedicar parte de su tiempo a llevar a cabo investigaciones para que pudiera realizar la tesis doctoral bajo la dirección de Eugenii Iudin, otro colega del mismo laboratorio. Aunque Iudin falleció pocos meses después, durante los dos años y medio siguientes (de diciembre de 1958 a junio de 1961) 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 un pequeño estipendio así como cierto material que le permitía 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 *Zvezdnyje korabli*

(‘Las naves estelares’), del escritor ruso Efremov. El propio Denisyuk escribió en una ocasión que uno de los episodios de este libro le impresionó profundamente [48]. 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. Esta nueva técnica estaba basada en el trabajo del físico francés Gabriel Lippman sobre fotografía en color realizado a finales del siglo XIX [49] y por el cual obtuvo el Premio Nobel de Física en 1908. La técnica de Lippman consistía en proyectar la imagen creada por el objetivo fotográfico sobre una emulsión fotográfica de grano muy fino a la que había adosado una superficie de mercurio como espejo de modo que la luz reflejada en el espejo junto a la incidente da lugar a un patrón de ondas estacionarias. Los granos de plata se precipitan en los máximos de intensidad y se forman superficies que reflejan sólo la luz en una banda estrecha alrededor del color original, ya que sólo para este color las ondas difundidas en las superficies de Lippman se superponen en fase [21]. Como dato anecdótico, esta técnica fotográfica de Lippman fue utilizada y desarrollada con éxito por nuestro Premio Nobel de Medicina, Santiago Ramón y Cajal, tal y como queda recogido en su libro *Fotografía de los colores* [50] editado en Madrid en 1912. Ramón y Cajal fabricó sus propias placas fotográficas y en su libro da consejos y proporciona un método para obtener placas de espesor uniforme y buena sensibilidad.

Volviendo a la técnica propuesta por Denisyuk, éste hacía incidir las ondas objeto

y referencia por las caras opuestas de la placa fotográfica formada por una lámina de vidrio en la que estaba depositada la emulsión fotosensible. Para ello situaba el objeto 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 fotografiado en la placa fotográfica (Figura 13).

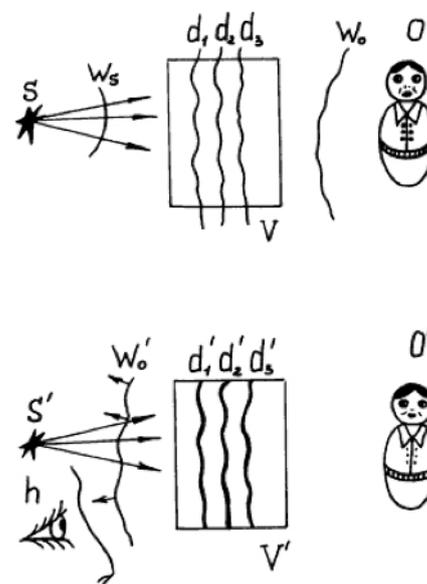


Figura 13. Registro y reconstrucción de un holograma de reflexión (Y. N. Denisyuk, “My way in Holography”, *Leonardo*, Vol. 25, N° 5, 425-430, 1992. Dibujo original de Yuri Denisyuk).

Esta placa, una vez revelada, se ilumina con un haz de reconstrucción de luz blanca y el objeto aparece en su posición original y del mismo color que el de la luz empleada en el registro (siempre que no haya variación en el espesor de la capa de la emulsión fotográfica). A partir de 1959 Denisyuk empezó a fabricar sus propias emulsiones fotográficas para que fueran capaces de registrar el patrón de ondas estacionarias y en 1962 anunció su descubrimiento que denominó *fotografía de ondas*. Sin embargo, hay un aspecto importante que diferencia las ideas de Gabor y Denisyuk. Mientras que Denisyuk concibió

sus estudios como el almacenamiento de un patrón de ondas estacionarias en todo el volumen de la emulsión fotográfica, es decir, un almacenamiento tridimensional, para Gabor se trataba del almacenamiento bidimensional del diagrama interferencial en la superficie de la emulsión. Las fuentes luminosas que disponía Denisyuk eran lámparas de mercurio con una longitud de coherencia de unas pocas décimas de milímetro por lo que sus hologramas eran de objetos con poca profundidad como espejos convexos con grandes radios de curvatura. Más adelante Denisyuk señaló que lamentaba no haber pensado hacer uso de otros 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. Esto es una prueba de que en holografía la elección del objeto determina en muchas ocasiones el éxito de las investigaciones científicas y de los resultados artísticos [48]. Denisyuk publicó un primer artículo sobre este tema en 1962 en una revista de la Unión Soviética y en ruso [51]. Después de éste, publicó otros dos artículos incluyendo más resultados, pero tuvo dificultades para que fueran aceptados por los científicos rusos responsables de la revista. Tras completar su tesis doctoral en 1961, Denisyuk volvió a sus antiguas investigaciones sobre instrumentación óptica para la armada soviética como jefe de un nuevo laboratorio de investigación, de modo que sus oportunidades para continuar con su trabajo en la *fotografía de ondas* eran muy limitadas [48]. Como el mismo señaló, la investigación en esta técnica languideció en la Unión Soviética en los años siguientes a 1961 y para sus contemporáneos la conexión de su trabajo con la *reconstrucción del frente de onda* de Gabor era marginal y además, ambos esquemas parecían estériles y sin posibles aplicaciones. La *fotografía de ondas* de Denisyuk, recibida al principio con gran escepticismo –cuando no con cierto menosprecio– [52], desempeñó un papel trascendental en la evolución futura de la holografía así como en algunas

de sus aplicaciones más importantes. Sus investigaciones no fueron conocidas fuera de la 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 y Denisyuk recibió el premio Lenin, la más alta distinción científica de la antigua Unión Soviética, y fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de la URSS.

Leith y la “fotografía sin lentes”

En 1971, en su discurso pronunciado con motivo de la concesión del Premio Nobel de Física, Gabor indicó que “alrededor de 1955 la holografía entró en una larga hibernación hasta la invención del láser a comienzos de los años sesenta” [43]. Sin embargo, esta afirmación no es del todo correcta. Leith, el tercer personaje de nuestra historia, en más de una ocasión 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 laboratorios distintos [28]. Uno de tales ambientes totalmente invisibles para occidente era el Instituto Vavilov de Leningrado, donde Denisyuk trabajaba es su *fotografía de ondas*. El otro era un laboratorio clasificado de la Universidad de Michigan.

La tercera formulación independiente de la holografía la realizó Emmett Leith (1927-2005) (Figura 14) en los laboratorios de Willow Run cerca de Ann Arbor, en los que trabajaban investigadores de la Universidad de Michigan en contratos clasificados para el ejército de los Estados Unidos [53]. Leith nació en Detroit en 1927. Después de haber completado sus estudios de física en la Universidad del Estado de Wayne, entró en los laboratorios de Willow Run en 1952 para trabajar en un programa militar secreto denominado *Proyecto Michigan* relacionado con el radar de apertura sintética (SAR) [13, 54].



Figura 14. Emmett Leith (1927-2005) (AIP Emilio Segré Visual Archives, Physics Today Collection).

Durante 1955 y 1956 Leith reformuló la teoría del radar de apertura sintética en términos de la óptica física, campo que conocía muy bien. Él era uno de los pocos físicos en un equipo de ingenieros, conocidos en Estados Unidos como *ingenieros eléctricos* y cuyo equivalente en España podría ser una mezcla de ingenieros electrónicos y de telecomunicación. Leith 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 realmente estaba registrando en las fotografías un patrón interferencial de ondas de radar. Hoy se puede decir que la técnica del radar de apertura sintética es realmente holográfica y se realiza con ondas electromagnéticas de longitud de onda cien mil veces mayor que la de la luz [21]. En el proceso de registro se ilumina el terreno con el haz desde un avión que lleva velocidad uniforme, la señal de vuelta se recoge y se mezcla con un oscilador local con lo que se registra información de la amplitud y la fase de la onda. Leith acababa de *reinventar* la holografía y entre 1955 y 1956 desarrolló una teoría completa de la misma en la región de las microondas [53]. En octubre de 1956

conoció el trabajo de Gabor a través de un artículo sobre la reconstrucción del frente de onda publicado por Kirkpatrick y El-Summ [55], y comprobó que tenía relación con sus investigaciones sobre radar. El problema es que Leith trabajaba en un proyecto secreto y ni podía publicar sus resultados, ni comentar sus investigaciones con nadie más allá de las paredes del laboratorio de Ann Arbor.

En 1960 Juris Upatnieks (1936-) (Figura 15), un joven ingeniero eléctrico, comenzó a trabajar como asistente de investigación de Leith y entre los dos repitieron algunos de los experimentos de Gabor, primero usando una lámpara de mercurio como fuente de iluminación y luego un láser de He-Ne. Leith y Upatnieks contaban con una ventaja respecto a Gabor y Denisyuk y es que a principios de los años sesenta ya se había inventado el láser por lo que se disponía de un haz de luz coherente.



Figura 15. Juris Upatnieks y Emmett Leith (AIP Emilio Segré Visual Archives, Physics Today Collection).

Aplicando la teoría de la comunicación a la reconstrucción del frente de onda [56], Leith y Upatnieks idearon distintas formas de soslayar el problema de las imágenes dobles que tanto había atormentado a Gabor, en particular idearon la técnica del *haz de referencia inclinado*. Haciendo uso de su trabajo previo, Leith adoptó el principio del *radar de observación lateral* que años atrás le había ayudado a reducir el ruido de las señales de radar. En sus primeros experimentos sobre

Holografía: ciencia, arte y tecnología

holografía, Leith desplazó el haz de referencia fuera de la dirección del haz objeto y a mediados de 1963 publicaron sus resultados bajo el nombre de *fotografía sin lentes* [57]. 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 no en la misma dirección como en el holograma de Gabor, sino que sus direcciones de propagación forman un cierto ángulo entre sí (Figura 16). Con ayuda de este nuevo esquema de registro, las imágenes virtual y real quedan separadas angularmente en la etapa de reconstrucción. A partir de entonces quedó definido el esquema para el registro de hologramas, al tiempo que posibilitó la obtención de hologramas de objetos difusores. Esta técnica de holografía fuera de eje tuvo un enorme impacto y fue crucial para el avance de la holografía como una tecnología realmente útil. Entre otras cosas hizo posible almacenar cientos de imágenes distintas en una misma placa, sin más que cambiar para cada una

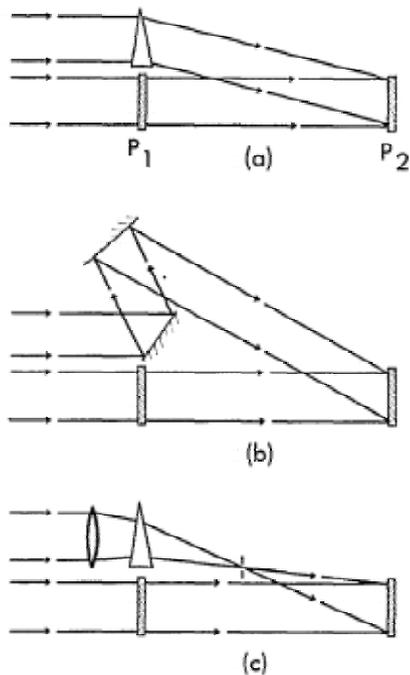


Figura 16. Métodos utilizados por Leith y Upatnieks para introducir un haz de referencia fuera de eje. (a) prisma; (b) dos espejos; y (c) lente, prisma y pinhole. (E. N. Leith y J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with continuous tone objects", *J. Opt. Soc. Am.* 53, 1377-1381, 1963.

Figura cortesía de Juris Upatnieks).

de ellas el ángulo de incidencia de la onda objeto.

Los primeros hologramas fuera de eje que realizaron eran de objetos bidimensionales: textos en color negro sobre fondo blanco, textos transparentes sobre fondo negro (Figura 17) y fotografías en blanco y negro de la hija de Leith y el hermano de Upatnieks. Todos ellos aparecen en un artículo publicado en la revista *Journal of the Optical Society of America* en diciembre de 1963 [57]. En ese mismo mes muchos periódicos americanos 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. El *New York Times* y el *Wall Street Journal* dieron especial atención a la noticia, por delante de otras de mayor actualidad en la época como las relacionadas con el asesinato del presidente Kennedy, ocurrido dos semanas antes de la publicación del artículo de Leith y Upatnieks. El *New York Times* entrevistó a Leith por teléfono durante una hora y publicó un artículo de media página, mientras que el artículo del *Wall Street Journal* se centraba más en las aplicaciones en microscopía, aunque dedicaba dos tercios de su espacio a la descripción de los principios de la *fotografía sin lentes* [13]. Curiosamente, al mismo tiempo que los resultados de Leith y Upatnieks de hologramas de objetos bidimensionales aparecían en casi todos los periódicos americanos, ellos ya estaban aplicando su técnica al registro de objetos tridimensionales. Como buenos científicos no iban a informar a la prensa de sus nuevos y sorprendentes resultados hasta que fueran presentados en algún congreso científico, aparecieran publicados en una revista especializada o fuera patentada la técnica. Sin embargo, Leith en su entrevista del *New York Times* insinuó al reportero las posibilidades de hacer hologramas de objetos tridimensionales, pero éste no comprendió a que se refería o no lo consideró importante pues este *pequeño detalle* no apareció en la noticia.

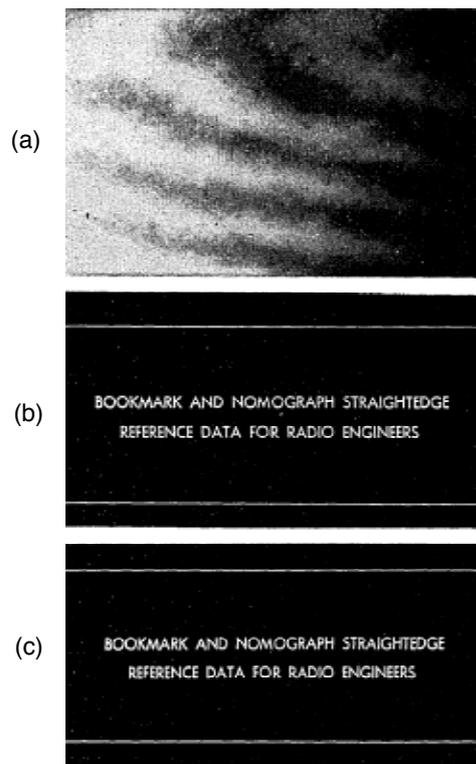


Figura 17. (a) Holograma, (b) reconstrucción y (c) original de un objeto bidimensional (E. N. Leith y J. Upatnieks, “Wavefront reconstruction with continuous tone objects”, *J. Opt. Soc. Am.* 53, 1377-1381, 1963. Figura cortesía de Juris Upatnieks).

El viernes 3 de abril de 1964, en la última sesión de la reunión de la *Optical Society of America* celebrada en el Hotel Sheraton de Washington, Upatnieks presentó su trabajo sobre hologramas de objetos tridimensionales. 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* (Figura 18). Cuando se iluminaba el holograma convenientemente con la luz del láser aparecía una imagen tridimensional que tenía todas las propiedades del objeto original, incluyendo un completo paralaje. No fue la exposición oral 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 científicos, 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 [58, 59]. Muchos preguntaron “¿dónde está el tren?”, a lo que Leith contestó “lamento tener que decirlo, el tren está de vuelta en Ann Arbor” [60]. Leith y Upatnieks ampliaron la información presentada en la reunión en un artículo publicado en noviembre de 1964 en la revista *Journal of the Optical Society of America* [61], uno de los artículos más citados en los noventa años de existencia de esta revista. 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.

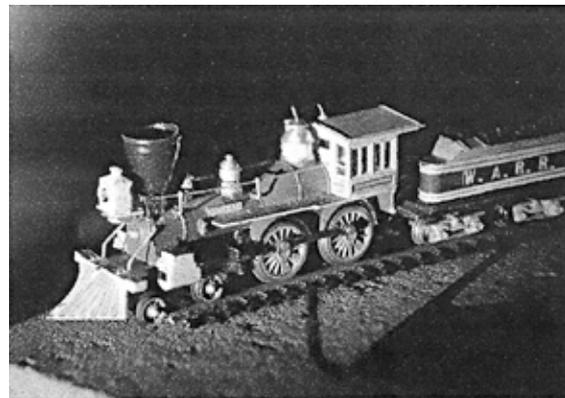


Figura 18. Fotografía de la imagen de uno de los primeros hologramas de transmisión de un objeto tridimensional (E. N. Leith y J. Upatnieks, “Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects”, *J. Opt. Soc. Am.* 54, 1295-1381, 1964. Figura cortesía de Juris Upatnieks). El tren original del que se hizo el holograma puede verse en la Figura 15, justo delante de Upatnieks.

El trabajo inicial de Leith sobre radar tuvo un gran valor militar y permaneció clasificado hasta 1968. En particular, sus contribuciones al desarrollo de nuevas técnicas ópticas para procesar datos del radar de apertura sintética permitieron obtener por primera vez imágenes radar de gran resolución. Además de un investigador reconocido internacionalmente, Leith era también un magnífico profesor tanto en el aula como en el laboratorio. Tenía una profunda pasión y una extraordinaria intuición física para la óptica y el procesado óptico. Sus lecciones sobre procesado óptico y holografía introdujeron en este campo a futuros investigadores, además de proporcionar a los

estudiantes de ingeniería una clara ilustración de la potencia del análisis de Fourier en ingeniería óptica [54]. En 1979 Leith recibió de manos del presidente Carter la medalla Nacional de la Ciencia, la más alta distinción científica de los Estados Unidos.

La “explosión” holográfica

En las casi dos décadas transcurridas desde 1947 y 1964 la holografía era un *collage* construido desde distintas perspectivas [13, 28]. 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 Denisyuk 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 [10], 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 [62], 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* [63], 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 [64]. 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 [13]. 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 tanto científicos e ingenieros como artistas podían aprender la nueva técnica [60]. 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 [65, 66].

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 [13], 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, hasta que en 1971 la Real Academia Sueca de las Ciencias anunció la concesión del Premio Nobel de Física a Dennis Gabor (Figura 19) “por la invención y desarrollo del método holográfico”.



Figura 19. Ganadores de 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 la concesión del Premio Nobel manifestando lo siguiente [43]: “Soy uno de los pocos físicos afortunados que han podido ver como una idea suya se ha desarrollado hasta convertirse en una parcela de especial importancia dentro de la física. Soy consciente de que esto ha sido posible gracias a un gran número de jóvenes investigadores, entusiastas y con talento, de los cuales apenas podría mencionar el nombre de unos pocos. Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos ellos por haberme ayudado con su trabajo a conseguir los más altos honores científicos”.

En esta revisión de los orígenes y posterior desarrollo de la holografía no se puede dejar de mencionar a Stephen Benton (1941-2003) (Figura 20), cuyas ideas me han proporcionado, en cierto sentido, el título para esta lección “Holografía: ciencia, arte y tecnología”. Benton, científico de la *Polaroid Corporation* y posteriormente del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) [67], es otro de los investigadores que más ha influido en el desarrollo y difusión de la holografía, fundamentalmente de la conocida como *display holography* [68-71], aunque también trabajó en proyectos relacionados con el video holográfico y las películas holográficas. Fue un gran divulgador de la holografía a todos los

niveles y el organizador desde 1989 hasta 2002 de un congreso anual denominado *Practical Holography* al que tuve la suerte de asistir en dos ocasiones, en 1995 y 1996, en San Jose, California, donde tuve también la suerte de admirar una serie de magníficos hologramas en color realizados por Hans I. Bjelkhagen [72].



Figura 20. Stephen Benton (1941-2003) (Special Issue: Tribute to Professor Stephen A. Benton, *Holography-SPIE's International Technical Working Group*, Vol. 15, N° 1, 2004. Fotografía de R. D. Rallison).

En 1968, cuando Benton contaba con 27 años y simultaneaba un trabajo a tiempo parcial en la *Polaroid Corporation* y otro de profesor de física en la Universidad de Harvard, inventó una nueva clase de holograma conocido desde entonces como *holograma de arco iris* y también como *holograma de Benton* [73]. Este tipo de holograma es de 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 ve, aunque para ello se sacrifica el paralaje vertical manteniendo sólo el horizontal. La pérdida del paralaje vertical no tiene mucha importancia pues el paralaje horizontal domina como guía espacial al paralaje vertical del plano arriba-abajo, lo que hace que un observador mueva normalmente la cabeza en dirección horizontal y no en vertical. Esto sería distinto si nuestros ojos estuvieran situados uno encima del otro o si subiéramos y bajáramos muchos

árboles [74]. Pero no lo hacemos. De hecho, el énfasis horizontal de nuestra percepción es tan dominante que Benton concluyó que podía descartar por completo el paralaje vertical. En cualquier caso, el aspecto más importante es que el holograma de arco iris permite la producción masiva de hologramas utilizando la técnica de *embossing*, de modo que el holograma puede ser duplicado millones de veces con un bajo coste. Cuando en 1968 Benton mostró su holograma a Edwin Land, presidente y director de investigación de la *Polaroid Corporation*, éste comentó “bien, después de todo parece que la holografía tiene futuro” [60] y desde luego el holograma de arco iris contribuyó de forma importante a este futuro. Estos hologramas se utilizan, por ejemplo, en sistemas de seguridad y la primera vez que aparecieron en documentos de este tipo fue en tarjetas de crédito en 1983. Hoy día todos llevamos más de uno de estos hologramas en nuestra cartera y algo parecido sucede con los billetes de euro que también llevan esta clase de hologramas. 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. En la misma publicación se incluyó el holograma del cráneo de un australopiteco en la portada de noviembre de 1985 y el de una bola del mundo en la de diciembre de 1988. Benton es una pieza clave en el desarrollo de la holografía moderna y no sólo ha sido fundamental en aplicaciones científicas y tecnológicas, sino que también destaca su faceta artística. Él mismo 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” [75].

En el origen y posterior desarrollo de la holografía han participado científicos, ingenieros e incluso artistas, pero no como colectivos trabajando de forma independiente, sino mediante verdaderos equipos interdiscipli-

nares. La explosión holográfica de principios de la década de 1960 que tuvo lugar en la Universidad de Michigan se debió en gran parte a la fructífera colaboración y a la sinergia de físicos e ingenieros que supieron aunar los conocimientos de óptica física de los primeros con los de teoría de la comunicación de los segundos.

En 1986 Emmett 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” [66] y prueba de ello es que la técnica holográfica ha proporcionado y sigue proporcionando innumerables aplicaciones en multitud de campos científicos y tecnológicos, además de tratarse de uno de los “raros” campos científicos que ha proporcionado un medio para el arte [76]. Es difícil, por no decir imposible, enumerar todos los desarrollos y aplicaciones a los que ha dado lugar la holografía, por lo que a continuación únicamente se van a mencionar algunos de ellos.

La *interferometría holográfica* fue una de las primeras aplicaciones de la holografía. Esta técnica fue descubierta de forma accidental –en un nuevo ejercicio de *serendipity*– en diciembre de 1964 por Kart Stetson y Robert Powell [77], miembros del Grupo de Óptica de la Universidad de Michigan, aunque Leith y Upatnieks ya se habían dado cuenta a finales de 1963 de las posibilidades de la holografía en interferometría. Se trata de una aplicación, desde luego menos espectacular que la realización de hologramas de objetos tridimensionales, pero de gran interés científico, técnico e industrial. Mediante esta técnica se pueden visualizar y analizar, por ejemplo, las deformaciones de un objeto debidas a esfuerzos, vibraciones o variaciones de temperatura, así como los modos de vibración de altavoces, instrumentos musicales o complejas estructuras. Además puede aplicarse al estudio de fenómenos de transporte, la visualización del flujo de fluidos, medidas de componentes en ambientes hostiles o corrosivos, la realización de ensayos

no destructivos e incluso se ha aplicado en otros campos como la ortopedia, en el estudio de las deformaciones de huesos y prótesis, o en estudios relacionados con la conservación y restauración de obras de arte. La Figura 21 muestra el estudio mediante interferometría holográfica en tiempo real de la distribución de temperatura en el interior de una bombilla [8]. A lo largo de las líneas que aparecen en el interferograma la temperatura es constante.

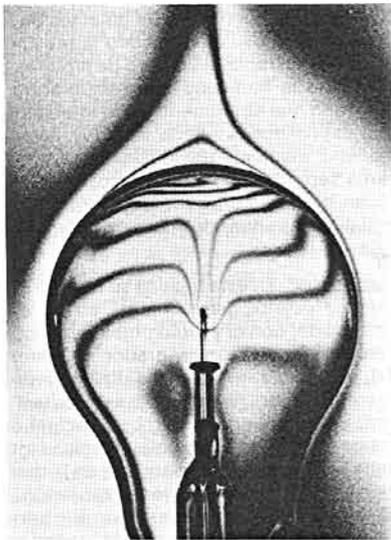


Figura 21. Estudio mediante interferometría holográfica de la distribución de temperatura en el interior de una bombilla [8].

El *análisis de partículas* microscópicas distribuidas en un determinado volumen es otro campo en el que la holografía ha mostrado ser de gran utilidad. En esta aplicación se hace uso tanto de configuraciones en eje como fuera de eje y suele utilizarse un láser pulsante. Con esta técnica es posible analizar el tamaño, la posición, el desplazamiento y la velocidad de las partículas [78] y 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 [79], lo que permitió disponer de un verdadero laboratorio espacial “virtual” en la Tierra.

Cuando se ilumina un holograma con la onda de reconstrucción se obtiene

la onda imagen que puede ser cualquier onda luminosa diseñada para un propósito específico. Con esta idea se fabrican *elementos ópticos holográficos* como lentes, espejos, redes de difracción y otros dispositivos más complejos [80]. Hay elementos ópticos holográficos en algunos tipos de *scanners* [81] con los que se leen los códigos de barras en los supermercados así como en los visores que utilizan los pilotos de aviones. Este tipo de elemento óptico holográfico, conocido como *head-up display* (HUD) [82], es básicamente un espejo holográfico, por tanto transparente, 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. Esta tecnología ha traspasado la frontera de la aplicación militar a la civil y pueden encontrarse en otro tipo de aviones e incluso en algunos coches de gama alta. En este último caso estos elementos permiten al conductor ver información como la velocidad del coche a través del parabrisas, sin necesidad de tener que bajar la vista y de este modo sin ser necesario dejar de mirar a la carretera. También es posible encontrar elementos ópticos holográficos en dispositivos de procesado óptico de información, interconectores de fibras ópticas utilizados en sistemas de comunicación, focalizadores del haz láser de las cabezas lectoras de CDs y DVDs, concentradores solares, sistemas para corregir aberraciones de lentes convencionales como las de los telescopios, protectores oculares frente a la radiación láser, redes de difracción para espectrómetros, etc.

También es posible generar mediante un ordenador el patrón correspondiente a la interferencia de dos ondas, de modo que la etapa de registro del holograma no se realiza físicamente, sino calculando con ayuda de un ordenador la distribución de intensidad. Dicho patrón interferencial puede mostrarse, por ejemplo, en la pantalla del ordenador lo que permite su fotorreducción y obtener de este modo un *holograma generado por ordenador*, aunque existen otros procedimientos de fabricación más sofisticados con los que pueden

almacenarse mayores frecuencias espaciales. El proceso de reconstrucción puede llevarse a cabo físicamente, bien iluminando con la luz de un láser, bien mediante el propio ordenador. Los hologramas generados por ordenador permiten generalizar las posibilidades de la holografía clásica y fueron producidos por primera vez en 1966 por Lohmann y Paris [83]. Adolf Lohmann, uno de los primeros que se habían interesado en la técnica de Gabor en la década de 1950, trabajaba desde principios de los años sesenta en el Departamento de Procesado de Señales Ópticas de la IBM en San José, California, y era el único miembro del equipo que tenía profundos conocimientos de óptica, tanto teóricos como experimentales, así como de programación de ordenadores [13]. Es importante señalar que en un holograma generado por ordenador no es necesario que el objeto a partir del cual se realiza el holograma tenga existencia real. Se puede definir un objeto cualquiera dando las coordenadas y las intensidades de sus puntos y el holograma obtenido permite visualizar en tres dimensiones el objeto imaginado. Es posible realizar figuras geométricas en el espacio o representar objetos en vías de fabricación sin que sea necesario construir modelos. Estos hologramas aportan, además, soluciones originales a los procedimientos de filtrado óptico, de almacenamiento de información y, en general, procesado óptico de la información. Este tipo de hologramas es sólo una parte de un campo más amplio que recibe el nombre de *holografía digital* [84].

Los *hologramas de seguridad* son quizás la aplicación más importante de la holografía desde el punto de vista comercial [85]. La dificultad técnica que tiene la realización de algunos hologramas, el hecho de que sólo con medios técnicos complejos y sofisticados sea posible producir en serie copias de un holograma original y la facilidad para la observación de la imagen reconstruida por algunos de ellos mediante luz blanca han hecho de la holografía una técnica adecuada para sistemas de seguridad como los utilizados en tarjetas de crédito (40 millones sólo en

España), billetes de banco, documentos de identidad o etiquetas de productos comerciales [86]. Recientemente se están incluyendo hologramas de este tipo incluso en productos farmacéuticos, sobre todo en algunos que se comercializan en el sudeste asiático contra la malaria, donde la venta de medicinas ilegales en el mercado negro está muy extendida [87]. En todos estos casos, la utilización de hologramas pretende evitar o por lo menos hacer mucho más difícil su falsificación [88]. Asimismo, también se están empezando a utilizar métodos holográficos para la autenticación de huellas digitales [89].

El principio de la holografía también se aplica a ondas longitudinales como las acústicas dando lugar a la *holografía acústica* [90]. Es fácil producir ondas ultrasonoras coherentes y también es posible “iluminar” objetos extensos con ultrasonidos. Las fuentes de este tipo presentan un interés particular por el notable poder de penetración de las ondas acústicas en líquidos densos y sólidos, contrariamente a lo que sucede con la luz. En este caso, para realizar el holograma acústico, se hacen interferir dos ondas sonoras, mientras que se usa la luz del láser para iluminar este holograma y obtener una imagen reconocible. La holografía acústica encuentra aplicaciones de gran interés en geofísica, metalurgia, arqueología o medicina, siendo posible obtener, por ejemplo, imágenes tridimensionales de órganos internos del cuerpo humano.

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 [91]. La versatilidad de la técnica holográfica para el almacenamiento de información procede de las innumerables formas de producir hologramas y extraer la información que se almacena. Se pueden obtener hologramas de objetos puntuales y extensos tomando ondas de referencia planas y esféricas. Es posible modificar los ángulos de iluminación o iluminar con ondas por distintos lados de la placa. Un aspecto importante de

la holografía es el *multiplexado* que permite almacenar varios hologramas en una misma posición del material, pero de modo que éstos se puedan reconstruir separadamente, lo que permite que la información de diferentes objetos se pueda recuperar por separado. Estos objetos pueden ser tridimensionales, imágenes o páginas de texto. Éste es el principio de las *memorias ópticas holográficas* en las que se puede almacenar en poco espacio una gran cantidad de información. La idea de utilizar hologramas en el almacenamiento de datos realmente no es nueva, ya que fue inicialmente propuesta por Van Heerden en 1963 [92], no mucho tiempo después de que Leith y Upatnieks publicaran sus primeros resultados. Sin embargo, desde entonces las mayores dificultades técnicas para llevarla a la práctica han estado relacionadas con la obtención de un material de registro adecuado [93]. Empresas como *Aprilis* [94] o *InPhase* [95] ya han fabricado los primeros prototipos de sistemas de almacenamiento holográfico y, en abril de 2007, *InPhase* presentó discos holográficos comerciales con una capacidad de almacenamiento de 300 GB (300 mil MB), es decir, el equivalente a más de sesenta DVDs en un solo disco, con una velocidad de transferencia de datos de 200 MB/s [96], y se sigue investigando para obtener mayores capacidades de almacenamiento, incluso del orden del TB (un millón de MB).

¿Y qué hay de la idea original de Gabor de utilizar la técnica de *reconstrucción del frente de onda* para mejorar la calidad de imagen del microscopio electrónico? La respuesta es que hubo que esperar casi cuarenta años para poder disponer de haces coherentes de electrones que hicieran posible llevar a cabo esta aplicación y hacia 1989 ya se disponía de un instrumento comercial que permitía realizar hologramas con haces de electrones [97]. De este modo es posible registrar el patrón interferencial de los haces objeto y referencia utilizando electrones y reconstruir una imagen óptica al iluminar el holograma con el haz de un láser, tal y como había pensado Gabor en 1947.

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* [98] 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. 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. 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. Lejos de ser una ventana fija abierta a un espacio fijo, el holograma actúa, en este caso, como una ventana con memoria [27].

Otro campo en el que también ha participado la holografía es el del retrato. El primer *retrato holográfico* fue realizado la noche de Halloween de 1967, hace ahora cuarenta años, por Lawrence Siebert de la Empresa *Conductron* de Ann Arbor, Michigan, y se trataba de un autorretrato [99]. Realizar hologramas de personas presenta dos problemas importantes, en primer lugar, las personas no pueden estar quietas durante la exposición y, en segundo lugar, tienden a cerrar los ojos cuando se exponen a la luz del láser. Aunque la persona intente estar completamente en reposo, no puede dejar de respirar, sus músculos no están rígidos y su corazón sigue latiendo. Todo ello produce movimientos. Siebert resolvió este problema utilizando láseres pulsantes cuyos breves pulsos de luz duran unos pocos nanosegundos. Mediante la utilización de este tipo de láseres 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 Dennis Gabor (Figura 22) realizado en 1971 por R. Rhinehart de la

Holografía: ciencia, arte y tecnología

McDonnell Douglas Electronics Corporation para celebrar la concesión del Premio Nobel de Física [100].



Figura 22. 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 [21]. 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 (Figura 23).

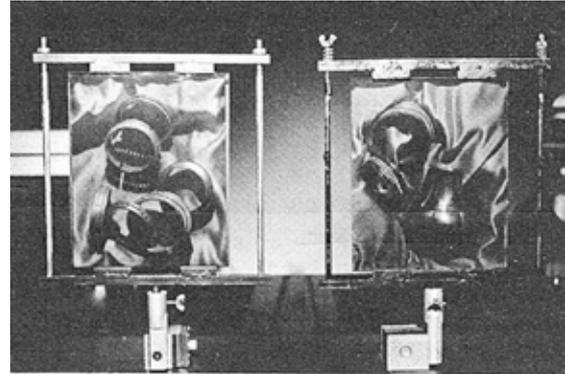


Figura 23. Fotografías de hologramas de reflexión del Tesoro de Villena y detalle de uno de ellos (hologramas realizados por José Antonio Quintana, Centro de Holografía, Universidad de Alicante, 1984) [8].

Otro aspecto que ha interesado desde los comienzos de la holografía es la obtención de *hologramas en color*. Cuando se registra un holograma con un láser, la imagen reconstruida es monocromática, sin embargo mediante la utilización de tres láseres con longitudes de onda en las zonas de los tres colores primarios (Figura 24) [101], 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.

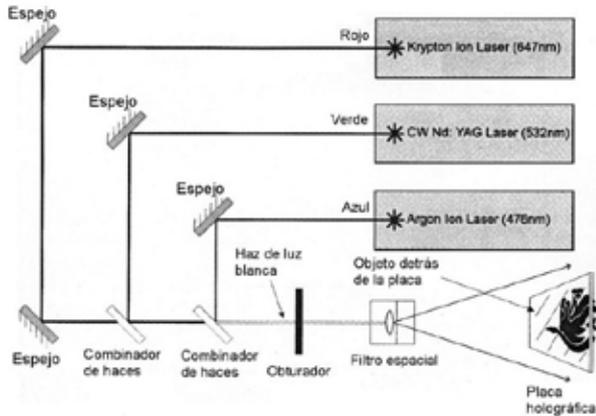


Figura 24. Registro de un holograma de reflexión en color usando tres láseres (H. J. Caulfield, Ed., *The Art and Science of Holography: A Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk*, SPIE Press, Bellingham, 2004. Figura cortesía de Hans Bjelkhagen).

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 museos, 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 incluido 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. En sus sesenta años de vida, y a pesar de sus erráticos inicios, la holografía ha demostrado tener un gran pasado y un magnífico presente, pero desde luego lo que es innegable es que sigue teniendo un futuro prometedor.

REFERENCIAS Y NOTAS

1. Real Decreto 6/2007, de 12 de enero, BOE del 16 de enero, por el que se declara el 2007 Año de la Ciencia y se crea la Comisión para su celebración (ver también <http://www.ciencia2007.es>).
2. Intervención de Mercedes Cabrera, Ministra de Educación y Ciencia, en el acto de entrega de los Premios Nacionales de Investigación, 16 de enero de 2007 (Gabinete de Comunicación, Ministerio de Educación y Ciencia).
3. J. M. Suay, “La Ciencia y la Tecnología: ¿otras dos culturas?”, *Acta Nova*, Vol. 1, N° 4, 432-437 (2002).
4. C. P. Snow, *Las dos culturas y un segundo enfoque* (Alianza Editorial, Madrid, 1977).
5. J. A. Azcárraga, “Ciencia, Sociedad y Universidad”, *Revista Española de Física*, Vol. 12, N° 3, 15-19 (1998).
6. La holografía en España se remonta a casi cuarenta años atrás. Un grupo de investigadores encabezados por Mariano Aguilar, catedrático de Óptica de la Facultad de Ciencias Físicas de Valencia, creó el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante (entonces Colegio Universitario) en el año 1968. El interés de este profesor hacia la holografía le lleva a iniciar a algunos de sus estudiantes en esta técnica. Este equipo, dirigido en sus comienzos por el Profesor Justo Oliva, fue el que realizó las primeras investigaciones sobre holografía no sólo en Alicante sino también en España (pueden encontrarse más detalles en las referencias 7 y 8).
7. N. Torralba, *Holografía Artística: Holografía Creativa Española 1983-1993* (Instituto de Cultura “Juan Gil-Albert”, Alicante, 1996).
8. AAVV, *Holografía* (Centro de Holografía de Alicante, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante, 1984).
9. 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. 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.
10. H. I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and Their Processing* (Springer-Verlag, Berlin, 1995).
11. J. Ludman, H. J. Caulfield y J. Riccobono, *Holography for the New Millenium* (Springer-Verlag, Nueva York, 2002).
12. R. R. A. Syms, *Practical Volume Holography* (Oxford University Press, Oxford, 1990).
13. S. F. Johnston, *Holographic Visions. A History of New Science* (Oxford University Press, Oxford 2006).
14. G. Saxby, *Practical Holography* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 2004).
15. P. Hariharan, *Optical Holography: Principles, Techniques and Applications* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
16. P. Hariharan, *Basics of Holography* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002).
17. H. J. Caulfield, Ed. *The Art and Science of Holography. A Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 2003).
18. A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia, “Model for analyzing the effects of processing on recording material in thick hologramas”, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 9, 1214-1223 (1992). –Special Issue: Progress in Holography-.
19. H. I. Bjelkhagen, Ed., *Selected Papers on Holographic Recording Materials MS 130* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1996).
20. E. Downing, “Holographic images – The intersection of art, science, and technology”, *Spectrum MIT*, invierno 1999 (<http://web.mit.edu/giving/spectrum/winter99/holographic.html>).
21. M. Quintanilla, “Holografía, Ciencia y Arte”, *Revista de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, Vol. 60, 57-64 (2005).
22. E. Hecht, *Óptica* (Addison Wesley, Madrid, 1999).
23. A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia, “Holografía: Conceptos básicos, materiales de registro y aplicaciones”, *Revista Española de Física*, Vol. 5, N° 3, 40-46 (1991).

24. 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*, saltó a las páginas de *The New York Times* y en España fue *El País* el que dedicó mayor atención a la “noticia” en su número del 23 de octubre de 2002. 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*.
25. M. Lozano, *De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física* (Debate, Barcelona, 2005).
26. M. Born y E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (7ª edición, Pergamon Press, Londres, 1999).
27. N. Abramson, *The Making and Evaluation of Holograms* (Academia Press, Londres, 1981), p. 70.
28. E. N. Leith, “Reflections on the origin and subsequent course of holography”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5005, 431-438 (2003).
29. E. N. Leith, “Overview of the development of holography”, *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 41, 201-204 (1997).
30. S. F. Johnston, “Reconstructing the history of holography”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5005, 455-464 (2003).
31. T. E. Allibone, “White and black elephants at Aldermaston”, *Journal of Electronics and Control*, Vol. 4, 179-192 (1958).
32. S. F. Johnston, “From white elephant to Nobel Prize: Dennis’ Gabor wavefront reconstruction”, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 36, 35-70 (2005).
33. H. Kragh, *Generaciones Cuánticas. Una Historia de la Física del siglo XX* (Ediciones Akal, Madrid, 2007).
34. T. E. Allibone, “The life and work of Dennis Gabor; his contributions to cybernetics, philosophy and social sciences”, *The Dennis Gabor Memorial Lecture given to the Cybernetics Society on the 23rd of April 1985*.
35. T. E. Allibone, “Dennis Gabor”, *Biographical Memoirs of the Fellows of the Royal Society*, Vol. 26, 107-147 (1980).
36. P. G. Tanner, T. E. Allibone y F. Eng, “The patent literature of Nobel Laureate Dennis Gabor (1900-1979)”, *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 51, 105-120 (1997).
37. P. Greguss, “Dennis Gabor – Inventor of ...”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4149, 1-11 (2000).
38. D. Gabor, “Autobiography” (<http://www.nobelprize.org>).
39. M. Taylor, “Dennis Gabor: Inventing our future”, *Holographic International*, N° 2, 28-30 (1998).
40. E. N. Leith, “The legacy of Dennis Gabor”, *Optical Engineering*, Vol. 19, 633-635 (1980).
41. D. Gabor, *Inventing the Future* (Secker & Warburg, Londres, 1963).
42. K. Biedermann, “Lippman’s and Gabor’s revolutionary approach to imaging”, 2005 (<http://www.nobelprize.org>).
43. D. Gabor, “Holography, 1948-1971”. Nobel Lecture, 1971 (<http://www.nobelprize.org>).
44. D. Gabor, “A new microscope principle”, *Nature*, Vol. 161, 777-778 (1948).
45. D. Gabor, “Microscopic by reconstructed wavefronts”, *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 197, 454-487 (1949).

46. S. F. Johnston, "Absorbing new Technologies: Holography as an analog of Photography", *Physics in Perspective*, Vol. 8, 164-188 (2006).
47. M. Benyon, "Holography as an Art Medium", *Leonardo*, Vol. 6, 1-9 (1973).
48. Y. N. Denisyuk, "My way in Holography", *Leonardo*, Vol. 25, N° 5, 425-430 (1992).
49. G. Lippman, "Photographie des couleurs", *Journal de Physique*, Vol. 3, 97-106 (1894).
50. S. Ramón y Cajal, *Fotografía de los Colores. Bases Científicas y Reglas Prácticas* (Prames, Zaragoza, 2007).
51. Y. N. Denisyuk, "On reflection of the optical properties of an object in wavefield of radiation scattered by it", *Optika i Spektroskopija*, Vol. 15, 522-532 (1962).
52. Y. N. Denisyuk y V. Gurikov, "Advancement of Holography, Investigations by Soviet Scientists", *History and Technology*, Vol. 8, N° 2, 127-132 (1992).
53. E. N. Leith, "A Short history of the Optics Group of the Willow Run Laboratories", en *Trends in Optics*, Vol. 3, editado por A. Consortini (Academic Press, Nueva York, 1996), pp.1-26.
54. K. Winick y R. Alferness, "In Memory. Emmett Leith (1927-2005)", *Optics and Photonics News*, Abril 2006, pp. 48-49.
55. P. Kirkpatrick y H. M. A. El-Sum, "Image formation by reconstructed wavefront. I. Physical principles and methods of refinement", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 46, 825-831 (1956).
56. E. N. Leith y J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 52, 1123-1130 (1962).
57. E. N. Leith y J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with continuous tone objects", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 53, 1377-1381 (1963).
58. S. F. Johnston, "Attributing scientific and technology progress: The case of holography", *History and Technology*, Vol. 21, N° 4, 367-392 (2005).
59. G. V. Novotny, "The little train that wasn't", *Electronics*, 86-89 (30 de noviembre de 1964).
60. T. Pakula, "Holography. The Whole Picture", *American Heritage of Invention & Technology*, Vol. 18, N° 3, 12-21 (2003).
61. E. N. Leith y J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 54, 1295-1381 (1964).
62. S. F. Johnston, "Shifting perspectives: Holography and the emergence of technical communities", *Technology & Culture*, Vol. 46, 77-103 (2005).
63. G. W. Stroke, *An Introduction to Coherent Optics and Holography* (Academic Press, Nueva York, 1966).
64. S. F. Johnston, "Telling tales: George Stroke and the historiography of holography", *History and Technology*, Vol. 20, 29-51 (2004).
65. R. Jackson, "A thirty-five year account of the development of holography", *Holosphere*, Vol. 12, N° 4, 5-17 (1983).
66. S. F. Johnston, "Holography. From Science to Subcultures", *Optics and Photonics News*, Julio 2004, pp. 36-41.
67. S. F. Johnston, "Stephen Benton on Holography, Polaroid and MIT", *Optics and Photonics News*, Agosto 2004, pp. 32-35.
68. AA.VV., "Special Issue: Tribute to Professor Stephen A. Benton", *Holography-SPIE's Internacional Technical Working Group*, Vol. 15, N° 1 (2004).
69. S. A. Benton, "Holographic displays. A review", *Optical Engineering*, Vol. 14, 402-407 (1975).
70. S. A. Benton, "Holographic displays: 1975-1980", *Optical Engineering*, Vol. 19, 686-690 (1980).
71. P. Hariharan, "Display Holography: A Technical Retrospect", *Leonardo*, Vol. 25, N° 5, 431-437 (1992).
72. H. I. Bjelkhagen y T. H. Jeong, "Recording and processing of silver-halide color holograms", *Proceedings of SPIE*, Vol. 2405, 100-107 (1995).
73. S. A. Benton, "Rainbow holograms", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 50, 1545-1546 (1969).
74. N. Negroponte, *El mundo digital* (Ediciones B, Barcelona, 1995).
75. AA.VV. *Light Dimensions. The Exhibition of the Evolution of Holography*. (Ardentbrook, Londres, 1984), p.75.

76. J. D. Trolinger y V. Markov, "Holography, Art, and Science – An Upcoming Course of Study at Irving Valley Collage", *7th Internacional Symposium on Display Holography*, Wales, 10-14 de julio de 2006.
77. K. A. Stetson y R. L. Powell, "Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 55, 1694-1695 (1965).
78. C. S. Vikram, *Particle Field Holography* (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).
79. J. D. Trolinger, R. B. Lal, D. McIntosh y W.K. Witherow, "Holographic particle-image velocimetry in the First International Microgravity Laboratory aboard the Space Shuttle Discovery", *Applied Optics*, Vol. 35, 681-689 (1996).
80. T. W. Stone y B. J. Thompson, Eds., *Selected papers on Holographic and Diffractive Lenses and Mirrors*, SPIE Milestone Series Vol. MS 34 (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1991).
81. L. D. Dickson y G. T. Sincerbox, "Holographic scanners for bar code readers" en *Optical Scanning*, G. E. Marshall, Ed. (Marcel Dekker, Nueva York, 1991).
82. R. L. Fisher, "Design methods for a holographic head-up display curved combiner", *Optical Engineering*, Vol. 28, 616-621 (1989).
83. A. W. Lohmann y D. Paris, "Binary Fraunhofer holograms generated by computer", *Applied Optics*, Vol. 6, 1739-1748 (1967).
84. T. Huang, "Digital holography", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 59, 1335-1346 (1971).
85. H. I. Bjelkhagen, "Improved Optical Document Security Techniques Based on Volume Holography and Lippmann Photography" en *Optical Imaging Sensors and Systems for Homeland Security Applications*, B. Javidi, Ed. (Springer-Verlag, Nueva York, 2006).
86. Hoy en día es posible encontrar hologramas de seguridad en productos muy variados: prendas deportivas, programas de ordenador, DVDs de películas, baterías de teléfonos móviles, etiquetas de denominación de origen para botellas de vino, entradas para eventos y espectáculos, etc.
87. P. Aldhous, "Hologram wars", *Nature*, Vol. 434, N° 7030, 132-133 (2005).
88. A. I. Hopwood, "New holographic overlay", *Proceedings of SPIE*, vol. 1509, 26-35 (1991).
89. K. G. Larkin y P. A. Fletcher, "A coherent framework for fingerprint analysis: are fingerprints holograms?", *Optics Express*, Vol. 15, 8667-8677 (2007).
90. B. P. Hildebrand, "Progress in acoustical holography", *Proceedings of SPIE*, Vol. 532, 63-88 (1983).
91. H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox (Eds.), *Holographic Data Storage* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
92. A. Hellemans, "Holograms can store Terabytes, but where?", *Science*, Vol. 286, n° 5444, 1502-1504 (1999).
93. P. J. Van Heerden, "Theory of optical information storage in solids", *Applied Optics*, Vol. 2, 393-400 (1963).
94. D. A. Walkman, C. J. Butler y Daniel H. Raguin, "CROP holographic storage media for optical data storage greater than 100 bits/ μm^2 ", *Proceedings of SPIE*, Vol. 5216, 10-25 (2003).
95. W. L. Wilson, L. Dhar y K. R. Curtis, "Progress toward the commercial realization of high performance holographic data storage: architecture and function of the InPhase Technologies holographic drive", *Proceedings of SPIE*, Vol. 6335, 63350G (2006).
96. <http://www.inphase-technologies.com>.
97. A. Tonomura, *Electron Holography* (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
98. H. Wilhelmsson, "Holography: A new scientific technique of possible use to artists", *Leonardo*, Vol. 1, 161-169 (1968).
99. L. D. Siebert, "Large-scene front-lighted hologram of an human subject", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 56, 1242-1243 (1968).
100. H. I. Bjelkhagen, "Holographic portraits made by pulse lasers", *Leonardo*, Vol. 25, 443-448 (1992).
101. H. I. Bjelkhagen, "Display holography: From Lippmann Photography to Color Holography" en *The Art and Science of Holography: A Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk*, H. J. Caulfield, Ed. (SPIE Press, Bellingham, 2004).