

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA

MÁS DE MEDIO SIGLO DE LA HOLOGRAFÍA

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. MANUEL QUINTANILLA MONTÓN

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 24 DE MARZO DEL AÑO 2010*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. MIGUEL ÁNGEL REBOLLEDO SANZ

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2010

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA

MÁS DE MEDIO SIGLO DE LA HOLOGRAFÍA

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. MANUEL QUINTANILLA MONTÓN

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 24 DE MARZO DEL AÑO 2010*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. MIGUEL ÁNGEL REBOLLEDO SANZ

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2010

Depósito legal: Z. 936 – 2010

Imprime:

Sdad. Coop. de Artes Gráficas
LIBRERÍA GENERAL
Pedro Cerbuna, 23
50009 Zaragoza
imprentalg@efor.es

MÁS DE MEDIO SIGLO DE LA HOLOGRAFÍA

POR EL

Ilmo. Sr. Don MANUEL QUINTANILLA MONTÓN

Excmo. Sr. Presidente,
Ilmos. Sres. Académicos,
Señoras y Señores:

Es mi deseo comenzar mi intervención en este acto expresando mi más profundo y sincero agradecimiento a esta Corporación. Me veo obligado, por razones temporales, a hacerlo primero a quienes formaban parte de la misma en el momento de mi elección, hace ya cinco lustros, y en segundo lugar a los que benévolamente aceptan hoy mi ingreso. En aquel momento eran mis queridos Profesores los que realizaron la proposición, hoy son mis buenos, ilustres y admirados compañeros los que como muestra de su amistad me aceptan a su lado.

He permanecido este tiempo unido a la Corporación desempeñando la tarea de tesorero de la misma, y ello por la magnificencia y aprecio de los tres últimos Presidentes: los ilustrísimos Prof. D. Juan Sancho de San Román, Prof. D. Enrique Meléndez Andreu y Prof. D. Horacio Marco Moll, de grato recuerdo, y continuando durante un corto espacio de tiempo con el actual Excmo. Sr. Presidente Prof. D. Luis Joaquín Boya Balet, que me ha animado a hacer efectiva mi incorporación a esta Real Academia.

Intuyo que es la tarea que desarrollé la que ha motivado se tolere mi tardanza en realizar este obligado y solemne acto de ingreso, representa un honor inmerecido que sobrepasa mi más íntima estimación.

Se tiene por costumbre recordar al Académico de Número que ocupó con anterioridad el puesto inscrito en la medalla asignada por la Corporación. Constituye un gran honor, y a la vez me causa desasosiego por lo que significa de ausencia, el que correspondiese a mi querido y admirado compañero Dn. José María Savirón de Cidón. Se acumulan gratos recuerdos como compañeros de carrera, como neófitos profesores e investigadores en el animoso equipo que formó y dirigió el Prof. D. Justiniano Casas, de nuestra primera publicación junto al maestro sobre su trabajo en Difusión Térmica, del despegue y participación en foros internacionales, de la consolidación del grupo con nuevas incorporaciones

como Domingo González y José Antonio Madariga.

En el discurso de ingreso en esta Academia del Prof. D. José María Savirón (25 de mayo de 1992) se hace un pormenorizado relato de la investigación realizada en Difusión Térmica en nuestro laboratorio de Zaragoza. Sus palabras sobre mi participación son generosas y laudatorias en demasía.

En el mismo acto, en el discurso de contestación, el Prof. D. Justiniano Casas relató una etapa crucial en nuestras vidas, aprendimos a investigar y a ser profesores en la Universidad, y ello en un ambiente humano y científico irreplicable. Allí realizó una semblanza certera de nuestro querido amigo D. José María Savirón y dejó para otra ocasión el hacer algo parecido sobre mí. Añoro aquella promesa de opinión que hubiese realizado si yo hubiera sido más diligente.

Una faceta a resaltar del Prof. José M Savirón fue su calidad profesoral, fue un excepcional profesor admirado y querido por sus discípulos. Se distinguió por sus amenas y documentadas clases y conferencias, por su talante innovador y su originalidad. Valga como muestra su libro "Problemas de Física en un año olímpico". Fue Decano de la Facultad de Ciencias de Zaragoza, a requerimiento de sus compañeros, en una época no exenta de dificultades. Del prestigio alcanzado a nivel nacional da cuenta el haber sido elegido Presidente de la Real Sociedad Española de Física.

Quiero resaltar que no fue la termodifusión nuestra única tarea común. Con motivo de mi incorporación a la Universidad de Zaragoza, después de diez cursos en la Universidad de Valladolid, reanudamos nuestra colaboración en investigación, esta vez en un tema nuevo, "la dinámica de fluidos", que facilitó la adaptación a mi nueva situación. Creo que lo narrado da cuenta de la amistad y compañerismo con quien me precedió en el puesto que voy a ocupar. Difícilmente podré alcanzar el prestigio con el que desempeñó su puesto. En este sentido es revelador que hace poco las autoridades locales, autonómicas y académicas hayan aceptado dar el nombre del Prof. José M Savirón a una Cátedra de divulgación de la Ciencia, cuyo actual director es el Prof. Alberto Carrión, que también fue su discípulo y amigo.

El motivo de la elección de la holografía como tema de mi discurso de ingreso es que mi actividad científica se ha relacionado en una gran parte con la óptica y en particular con la holografía. Los éxitos se deben a los muchos y buenos colaboradores con los que he tenido el privilegio y la fortuna de poder trabajar. La mayoría desempeñan puestos docentes en la Universidad o están en centros de investigación de prestigio.

Finalmente quiero dedicar este discurso, a mi familia, a los mayores y a los nietos, los más pequeños, personalizándola en su artífice María Teresa, mi esposa.

MÁS DE MEDIO SIGLO DE LA HOLOGRAFÍA

Inventada la holografía por Dennis Gabor (1) (1900-1979), ha pasado más del medio siglo que se considera necesario (2) para que una invención revolucionaria (1948) constituya un campo de aplicación generalizado.

Gabor (3) estaba muy interesado en la microscopía electrónica, que había superado el poder resolutivo de los mejores microscopios ópticos y que había llegado muy cerca de resolver estructuras atómicas.

El límite del poder resolutivo era inherente a las características de los objetivos del microscopio electrónico. Disminuir los efectos de la difracción aumentando el tamaño del diafragma de apertura implica aumentar la aberración esférica, y con ello la calidad de la imagen se deteriora.

Para soslayar este problema tuvo la siguiente idea (1): ¿por qué no tomar una mala imagen electrónica, pero una que contenga la información “total”, reconstruir la onda por métodos ópticos y corregirla en este rango de longitudes de onda? El proceso propuesto sería de dos etapas: la primera con el microscopio electrónico, para producir la figura interferencial entre el haz objeto y el fondo coherente, es decir, la parte no difractada del haz de iluminación. Al registro fotográfico de la interferencia de ambas ondas lo llamó “Holograma”, pues contiene la información total de la onda difractada por el objeto, tanto de su amplitud como de su fase.

En el libro “Principles of Optics” de Born y Wolf editado en 1959 se recoge (4) la técnica propuesta por Gabor limitando su tratamiento a los principios de óptica relacionados con el proceso.

No está muy claro cuándo se introdujo el término “holografía” para la “formación de imágenes por reconstrucción del frente de onda”, pero, en el primer libro sobre el tema, George W. Stroke (5) se atribuye la introducción del término al proceso que también se denomina con frecuencia fotografía tridimensional sin lentes. Se vendieron 3.665 copias sólo durante el primer año y hasta 1999 habían sido más de cincuenta mil los ejemplares vendidos. En este libro se reimprimieron los trabajos originales de Gabor (6), lo que añade un interés especial a esta publicación.

En el primer trabajo, y ante la dificultad de realizar un holograma con electrones, se propuso demostrar la técnica con luz. La experiencia, como indica Gabor (1), no fue fácil. El mejor compromiso entre coherencia e intensidad lo encontró en las lámparas de alta presión de mercurio, con las que se obtiene una longitud de coherencia de sólo 0,1 mm. Con el fin de obtener suficiente coherencia espacial con la luz de la raya verde del mercurio se ilumina un agujero de 3 micras de diámetro. Se obtenía una iluminación suficiente para hacer hologramas de microfotografías de alrededor de 1 mm de diámetro.

La pequeña longitud de coherencia forzó a un dispositivo en eje, lo que ha venido llamándose “holograma en línea” o de Gabor.

La figura interferencial grabada (“holograma”) tiene unas características especiales, que ya fueron analizadas por Gabor: si se ilumina con una onda plana un objeto puntual, la interferencia de la luz difundida por el objeto y la onda iluminante produce una figura interferencial de zonas circulares de Fresnel. Este sistema de franjas circulares se conoce en la literatura como lentes de Soret, que presentan la propiedad de tener dos distancias focales imagen, una positiva y otra negativa. Ello da una explicación sencilla de cómo, al iluminar el holograma en eje por la onda de referencia plana, se obtienen dos imágenes gemelas alineadas y que solo pueden separarse por focalización. Durante algunos años este fue objeto de investigación, pero la dificultad de hacer hologramas con electrones llevó en el año 1955 a un paro en la investigación. Hasta ese momento se habían publicado alrededor de cincuenta artículos sobre holografía.

Entre los científicos importantes en el desarrollo de la holografía se encuentra Emmet Leith (1927-2005), quien durante los años 1955 y 1956 trabajó en el proyecto, clasificado como confidencial, del “Radar aerotransportado de observación lateral” (Proyecto Michigan, relacionado con el radar de apertura sintética SAR). En 1966 reformuló la teoría del radar de observación lateral en términos de la óptica física.

Leith (7) propuso registrar, sobre una película fotográfica, la información de las ondas de radar difundidas por el terreno, para poder analizar dicha información por métodos ópticos en forma de imágenes. En el proceso de registro se ilumina el terreno con el haz radar desde un avión que lleva velocidad uniforme. La señal de vuelta se recoge y se mezcla con la de un oscilador local, con lo que se registra información de la amplitud y la fase de la onda. Con esta señal demodulada, se emplea un procedimiento original: se modifica la intensidad del haz de barrido de un tubo de rayos catódicos. Esta señal luminosa se utiliza para generar, sobre una película fotográfica que se desplaza horizontalmente, un holograma bidimensional.

El proceso de reconstrucción de la imagen del terreno se hace con luz utilizando una óptica anamórfica adecuada, y se consiguen imágenes con resolución mejor que un metro. La técnica se utiliza en cartografía de alta precisión (8).

El rango de longitudes de onda se había extendido (1) de la longitud de onda asociada a los electrones, unas cien mil veces menor que las ondas de luz visible, a las ondas electromagnéticas de microondas, unas cien mil veces mayor.

1. UNA SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE LA IMAGEN GEMELA

En el año 1962, Leith y Upatnieks (9) proponen y realizan un método que permite eliminar la superposición de las imágenes gemelas, consiste en utilizar un “haz de referencia fuera de eje”. Dan un método para emplear la luz de la raya verde de la lámpara de mercurio haciendo uso de un diseño empleado en interferometría, el del interferómetro de Mach-Zehnder, que permite controlar la diferencia de camino óptico recorrido por cada haz. No obstante, utilizaron para la realización de los hologramas la luz de un láser de helio-neón.

Los primeros hologramas fuera de eje usaron fotografías como objeto. Quizá por ello esta técnica fue denominada “fotografía sin lentes”. Los periódicos dieron cuenta de la noticia y se publicaron artículos sobre el tema. En la tercera edición de los “Principles of Optics” de Born and Wolf (1965) se incluye la reconstrucción de dichas escenas.

Al mismo tiempo que los resultados de Leith y Upatnieks sobre hologramas de objetos planos aparecen en todos los periódicos americanos (6), ellos estaban aplicando la nueva técnica al registro de objetos tridimensionales. En la reunión de la Optical Society of America (abril 1964) celebrada en Washington, Upatnieks presentó su trabajo sobre hologramas de objetos tridimensionales y, al finalizar su exposición, lo ilustró con un holograma que reproducía, al iluminarlo con luz láser, una imagen tridimensional de una máquina de tren que presentaba el aspecto del objeto original con los efectos de paralaje: la demostración fue impactante, el pequeño tren de juguete aparecía detrás de la placa como si se encontrase allí.

En un artículo de divulgación titulado “Fotografía por Láser” de Scientific American (10), dan cuenta de cómo la utilización del láser, como fuente coherente de luz, facilita la consecución de hologramas de objetos extensos. Señalan algunas propiedades importantes, como que, al iluminar objetos difusores, de cada punto del objeto va luz a todos los puntos de la placa de registro y, por ello, cada parte del holograma, cualquiera que sea su tamaño, puede reproducir la imagen total.

Es posible superponer varios registros en la misma placa y en la reconstrucción obtener cada imagen separadamente sin afectar unas a otras. Consiguieron registrar varias imágenes en la misma placa utilizando haces de referencia diferentes, y cada escena puede recuperarse iluminando con la onda apropiada. Esta técnica, fundamentada en la selectividad angular, constituye la base de las memorias holográficas.

2. YURI DENISYUK Y LOS HOLOGRAMAS DE REFLEXIÓN

Yuri Denisyuk (6), científico del Instituto Estatal de Óptica Vavilov de Leningrado, iniciaba en 1958 y de forma aislada una serie de estudios sobre lo que llamó "fotografía de ondas", su conexión con los trabajos de Dennis Gabor, que desconocía, no eran evidentes (11).

Para su trabajo se inspiró en el de Gabriel Lippman sobre fotografía en color por métodos físicos, por el cual obtuvo en 1908 el Premio Nobel de Física.

La técnica de Lippman consistía en proyectar la imagen creada por el objetivo fotográfico sobre una emulsión de grano muy fino, a la que había adosado una superficie de mercurio que actuaba como espejo. La luz reflejada en el espejo junto a la incidente producía ondas estacionarias. Al revelar, los granos de plata se precipitaban en los máximos de intensidad y se formaban superficies separadas aproximadamente la mitad de la longitud de onda predominante. Después de reveladas, al iluminar con luz blanca, las complejas superficies reflejaban luz sólo en una banda estrecha alrededor del color original, ya que únicamente para este color las ondas difundidas en las superficies de Lippman se superponen en fase.

En un primer momento Denisyuk, al igual que Gabor antes que él, se propone registrar (11) una sección del campo de la figura interferencial en una emulsión fotográfica delgada. Pero él dispone, al contrario que Gabor, que la onda de referencia se transmita hacia el objeto en vez de propagarse en la misma dirección que la onda objeto. Él utiliza una solución análoga al proceso de la fotografía en color de Lippmann, pero fuertemente simplificada: utiliza luz monocromática (una lámpara de arco de mercurio) en vez de luz blanca, un espejo curvado en vez del espejo de mercurio líquido, y un haz colimado en vez de una imagen focalizada. La luz de la lámpara de mercurio pasa a través de la emulsión, como onda de referencia, y después es reflejada en un espejo convexo como onda objeto. La interferencia de las ondas esféricas da ondas estacionarias en el seno de la emulsión. Denisyuk predice que puede crear una estructura en la emulsión con propiedades ópticas idénticas al objeto reflector inicial. Estos conceptos, por lo menos en su forma original, parecían no tener nada que ver con los propuestos por Gabor, ni teóricamente ni por sus características prácticas. La utilización de emulsiones mejoradas en sensibilidad y en poder resolutivo llevaron a Denisyuk a probar en 1959 que su esquema funcionaba. Sus hologramas actúan como espejos convexos, pero un tanto peculiares, pues cambian su longitud focal con la longitud de onda. Puede considerarse que éste fue el primer elemento óptico holográfico reflectivo (11).

Su trabajo aparece en una completa publicación en *Optika i Spectroskopija* (Optics and Spectroscopy) en 1962 (12). En otoño de 1965 tres grupos americanos redescubren

la geometría de Denisyuk que permite la reconstrucción de imágenes holográficas con luz blanca.

La explosión de la investigación en América, después de los trabajos de Leith y Upatnieks, da un notable impulso al conocimiento de los trabajos de Denisyuk en la Unión Soviética y gana en prestigio. En 1970 recibió el Premio Lenin y se le nombró Miembro Correspondiente de la Academia de Ciencias Soviética (11).

La investigación en nuevas emulsiones fotográficas de grano fino y adecuados procesos de revelado permitieron la obtención de hologramas de reflexión de Denisyuk de alta calidad y gran formato. La aplicación principal fue la representación de objetos de museo en hologramas, tales como las colecciones de los Museos del Hermitage y del Kremlin, que fueron admirados internacionalmente en exposiciones itinerantes.

3. MADUREZ DE LA HOLOGRAFÍA

En 1970 la holografía había alcanzado un alto grado de desarrollo, cientos de investigadores se dedicaban a los fundamentos de esta rama de la Física, a las aplicaciones científicas, a las técnicas y a su desarrollo como arte. A esta madurez no fue ajena la consecución de nuevas fuentes de luz láser que, por las características de monocromaticidad, coherencia y potencia, permitían realizar con facilidad el registro de hologramas de muy diferente tamaño y en tiempos inusuales en las primeras etapas de su invención.

Si bien fueron muchos los logros científicos, no es menos importante el impacto artístico y expositivo que alcanzó, lo que fue reseñado en los medios de comunicación. La primera exposición de holografía artística (6) tuvo lugar en Michigan en 1968 y la segunda en Nueva York en 1970. En 1971 comenzó a funcionar una escuela de holografía en San Francisco. De este modo la holografía se convirtió en un ejemplo inusual de campo científico en el que participaron grupos de muy distinta procedencia: físicos, ingenieros y artistas.

La explosión holográfica no sólo se manifestó en Estados Unidos de América. En 1970 se celebró en Besançon (Francia) el Simposio Internacional sobre "Aplicaciones de la Holografía" (13) al que acudieron unos cuatrocientos participantes mayoritariamente de países de Europa. Fue la primera ocasión en que Y. N. Denisyuk participó en occidente en un congreso presentando dos trabajos, uno de ellos sobre la determinación de la coherencia de la radiación por métodos holográficos.

Como indica E. Ingelstan en las conclusiones del Congreso, se trataron algunos temas con mayor profusión:

"De ellos la Interferometría Holográfica ocupó un puesto importante, industrias en todos los países han comenzado a utilizar esta técnica de medida y control, y se reco-

noicia un período interesante de desarrollo y simplificación de los procedimientos. Muy prometedora es la técnica de holografía promediada en el tiempo, que permite el estudio de objetos vibrantes con resultados interesantes y de fácil interpretación. El cambio de sensibilidad de la interferometría holográfica, que se realiza fácilmente, es particularmente interesante, y permite su aplicación en muy diferentes situaciones.

Se vislumbró otra técnica no holográfica, la interferometría de moteado ("speckle"), como un resultado emergente de la utilización de fuentes de luz láser.

Como segundo tema se destaca la utilización de láseres pulsantes para el estudio de fenómenos rápidos. Se pueden congelar escenas y estudiarlas después mediante técnicas ópticas, reproduciendo las imágenes holográficas.

Otro tema que ha tenido una particular atención ha sido el de nuevos materiales para el registro de la información, fotorresinas, fotopolímeros, etc. Se esperan obtener nuevos materiales que permitan el almacenamiento óptico de la información con una densidad mayor que los medios magnéticos.

Todos los trabajos presentados han mostrado que la holografía es un tema central de la óptica", concluía E. Ingelstam.

Quisiera señalar que la óptica española no fue ajena a esta demostración de interés y desarrollo de la holografía europea. Estuvo representada por cinco investigadores españoles, dos de la Universidad de Valencia, otros dos de la de Zaragoza y uno de Madrid. Pronto se formarían grupos que tomaron esta temática como eje principal de su investigación, y que se han mantenido desde entonces con contribuciones de reconocido interés.

4. DENNIS GABOR PREMIO NOBEL DE FÍSICA

En el año 1971, la Real Academia Sueca de Ciencias anunció la concesión del Premio Nobel de Física a Dennis Gabor "por la invención y desarrollo del método holográfico". En la lección (1) que pronunció con motivo de esta concesión, hizo un recorrido por todo lo que se había conseguido hasta ese momento, en gran medida gracias a las facilidades de las fuentes de luz láser:

- La fotografía sin lentes de Leith y Upatniek con el registro de información multiplexada, más de cien páginas en una sola placa.
- La interesante propiedad de que los hologramas de objetos difusos guardan información total en cada una de las pequeñas partes del mismo, es decir, actúan como "memorias distribuidas".
- La holografía con láseres pulsantes, de veinte a treinta nanosegundos, con los que se

pueden congelar escenas tridimensionales de una evolución ultrarrápida o realizar retratos holográficos.

- La interferometría holográfica promediada en el tiempo.
- La aplicación industrial de la interferometría holográfica como técnica no destructiva de análisis en las cadenas de producción. Y las técnicas auxiliares para el estudio de piezas con precisión controlada.
- Hace mención a la importancia de la holografía como medio de almacenar información.
- Destaca la aplicación en el reconocimiento de formas y procesado de imágenes, como la utilización del filtro de A. Vander Lugt.
- Propuso alguna aplicación nueva como la Holografía Panorámica dentro de lo que llamó Holografía Artística.

Gabor terminaba su exposición indicando la imposibilidad de hacer justicia a los cientos de autores que habían contribuido al desarrollo de la holografía, indicando que los artículos superaban los dos mil y que había más de una docena de libros en diferentes idiomas, y expresaba su agradecimiento por haberle ayudado con su trabajo a conseguir los más altos honores científicos.

5. HOLOGRAFÍA EXPOSITIVA. STEPHEN BENTON Y LOS HOLOGRAMAS ARCO IRIS

Los hologramas de transmisión necesitan de iluminación monocromática con fuentes de luz láser para la reconstrucción de imágenes de gran calidad, lo que no permite una utilización generalizada de hologramas como elementos artísticos particulares. Si a esto añadimos la dificultad de hacer reproducciones mediante procedimientos o dispositivos baratos, se comprende que su utilización como elementos expositivos no adquiriese un gran auge.

En 1969 publicaba Benton el nacimiento de un nuevo tipo de hologramas: los llamados “arco iris” (Rainbow holograms) (14), que permiten la reproducción de imágenes en hologramas de transmisión iluminando con luz blanca. La técnica puede emplear en su construcción un solo holograma, o bien impresionar un holograma primario que se utiliza para generar el holograma final. Benton sacrifica el paralaje vertical, no imprescindible para la visión tridimensional en general, con el fin de obtener una imagen nítida monocromática en el proceso de reconstrucción al iluminar con luz blanca de una fuente puntual.

El desarrollo de resinas fotosensibles, que conducen a redes de relieve superficiales, y la aplicación de técnicas de estampado de estos relieves en materiales poliméricos, junto a la posibilidad de depositar capas reflectoras manteniendo el relieve, condujeron a la reproducción fácil de hologramas de calidad y observables con fuentes de luz convencionales.

Su aplicación como elemento añadido de seguridad de las tarjetas VISA, además de como elemento decorativo, dio un gran impulso a la utilización de este tipo de hologramas. La originalidad de un elemento nuevo y difícilmente falsificable da carácter de seguridad al documento que lo incluye.

La técnica de estampado, que permite la reproducción de miles de hologramas arco iris a partir de un holograma patrón, se ha utilizado para la ilustración de portadas de libros o de revistas. Son bien conocidos el holograma de tipo Benton que ilustra la cubierta del ejemplar de Nacional Geographic de marzo de 1984, que reproduce un águila en un holograma de (62x102) mm². O la de la portada de la misma revista de noviembre de 1984, que reproduce el cráneo de un fósil de Australopithecus de tres millones de años de antigüedad, con un tamaño de (100x127) mm², y utilizando la técnica de dos canales de color, uno para el objeto y otro para el fondo.

La creación de hologramas arco iris con reproducción del color y movimiento fue una de las últimas etapas. Un ejemplo de estos estereogramas holográficos en color total lo constituye el realizado por Ken Haines en 1991, que representa un payaso primero sonriente y que pasa después a llorar sobre la rosa rota. La reproducción del color es excelente y la dinámica de la imagen impresionante. Para su realización se utilizan tres láseres con luces en las zonas R, G y B, siendo necesaria una alineación precisa de las películas originales para cada uno de los colores, lo que no está al alcance de cualquier laboratorio. Este estereograma en color total tiene un tamaño de (56x71) mm². Benton ha sido una pieza clave en el desarrollo de la holografía (6) no sólo en aplicaciones técnicas y tecnológicas, sino también en la faceta artística. Fue un gran divulgador de la holografía, y desde 1989 a 2002 organizó un congreso anual denominado "Practical Holography" en San José, California.

Como elemento de garantía de autenticidad de producto se han utilizado hologramas de alta calidad. La empresa Dupont produce en exclusiva un fotopolimero con el que se consiguen hologramas imagen de reflexión que reproducen escenas de alta calidad, resolución y eficiencia bajo cualquier iluminación con luz blanca, por lo que se han utilizado comercialmente con gran éxito. Por ejemplo, se encuentran en las baterías de los teléfonos móviles Nokia.

Aun cuando en muchos casos son solamente elementos difractivos, en otros se han utilizado hologramas de seguridad frente a la falsificación de papel moneda. No es el

único elemento, pero sí es fácil de identificar y difícil de falsificar.

La Casa de la Moneda española ha implementado un elemento difractivo en la acuñación de monedas de plata, que despierta la curiosidad. Modificando la dirección de iluminación y manteniendo la de observación se hacen visibles, bien el año de acuñación de la moneda bien la corona real que identifica la época de realización. Puede considerarse como un holograma imagen multiplexado.

6. LA HOLOGRAFÍA EN UN ENTORNO PRÓXIMO.

He indicado la presencia de algunos investigadores de nuestro país en el Congreso sobre Holografía en Besançon. Mariano Aguilar Rico, a la sazón en la Universidad de Valencia, promovió la implantación de un laboratorio de Óptica en Alicante, en lo que era colegio universitario dependiente de la Universidad de Valencia (6). Este laboratorio fue dirigido en sus comienzos por Justo Oliva y siguió los pasos de otros grupos en la promoción de la holografía. Así organizó en 1979 la primera exposición en Madrid, que volvió a repetirse entre 1984 y 1989 en una muestra itinerante que recorrió un gran número de ciudades de nuestro país, entre otras Zaragoza en la sede del Colegio de Arquitectos.

Como colofón de esta labor reunió más de 150 hologramas, varios de ellos de grandes dimensiones, para la exposición realizada en Madrid en 1992 con motivo de la capitalidad cultural europea, que se ubicaron en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Algunos de los hologramas fueron realizados en el Centro de Holografía de Alicante (1984) y como en otros lugares reprodujeron objetos de interés artístico y museístico como el Tesoro de Villena. Los hologramas fueron del tipo de Denisyuk, que permiten una iluminación con luz blanca.

Con el objetivo de popularizar la holografía, crearon unos cursos de "Iniciación a la holografía", que perduraron varios años, y a los que acudieron tanto científicos como artistas. En uno de ellos tuve el honor de participar como conferenciante.

Como autor de bellos y artísticos hologramas mencionaré al laboratorio del Profesor Ferran Canal en la Universidad Politécnica de Cataluña, en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, que dispone de una instalación con medios apropiados para realizar hologramas de gran formato.

Un caso excepcional lo constituye la empresa Alda Hológrafos S.L. en Vitoria (Álava) que montaron un laboratorio construido por ellos y han participado en el desarrollo artístico de la holografía. Actualmente, y como una continuación de su actividad, están creando imágenes tridimensionales con técnicas lenticulares que les permiten realizar presentaciones en gran formato y con exigencias mínimas en cuanto a iluminación.

El Museo de la Holografía de Barcelona constituye un ejemplo de lo que ha ocurrido en muchos casos en el mundo. De ser un lugar de exposición y venta de hologramas para disfrute particular, ha dejado de ser viable económicamente y ha desaparecido. Hoy en día muchos de estos centros y museos se han integrado en museos más generalistas, que han dejado alguna de sus secciones o salas a la exposición de hologramas. El Museo de la Ciencia de la ciudad de Valencia incluye una sala con la exposición de bellos hologramas, tanto de reflexión como arco iris.

Como una muestra de la utilidad expositiva de la holografía puede mencionarse la reconstrucción de imágenes de los tesoros de la Cámara Santa de la Catedral de San Salvador de Oviedo. En la girola de la Catedral se han expuesto hologramas de transmisión que reproducen imágenes de gran realismo de las cruces de los Ángeles y de la Victoria, el Arca de las Ágatas, el Cristo de Nicodemo y los dípticos Consular y de Gundisalvo. El mismo equipo de Oviedo ha realizado hologramas que reproducen de forma muy realista pinturas rupestres de las cuevas de Tito Bustillo y tienen en proyecto utilizar la técnica para otros objetos de arte de grandes dimensiones y profundidad.

También quiero mencionar que la Universidad de Salamanca organizó un curso, a cargo del Dr. Yuri E. Usanov del Instituto Estatal de Óptica de Vavilov de San Petersburgo, sobre "Procesado de material holográfico SLAVICH" que se celebró en julio de 1998. Se trabajó sobre placas Slavich procesadas por dos métodos diferentes, uno conducente a emulsiones con microcavidades y otro con revelado físico, que permiten conseguir hologramas de reflexión de muy alta calidad y bajo ruido. A este curso asistieron investigadores de las universidades de Zaragoza, Alicante y Salamanca.

La Universidad de Zaragoza ha mantenido una especialidad en Óptica durante más de veinticinco cursos, dentro de la cual se han impartido conocimientos teóricos y experimentales de holografía óptica. En los últimos años, y gracias al entusiasmo del profesor Jesús Atencia, se han realizado por los alumnos hologramas de interés y calidad expositiva. Estos, junto a otros adquiridos, de gran formato, han constituido la base para una exposición permanente. Ha sido utilizada en algunos eventos, para darlos a conocer con gran éxito a un público heterogéneo.

7. INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA

Una aplicación menos espectacular que la reproducción de escenas tridimensionales, pero científicamente de gran interés, es la interferometría-holográfica. Esta técnica permite obtener información a escala interferencial óptica de deformaciones de objetos difusores, o de sistemas transparentes sin calidad óptica, y comparar estados de deformación que ocurren en instantes de tiempo distintos.

El carácter más diferenciador de la interferometría holográfica frente a la convencional puede ser el de la interferometría no simultánea: en un holograma pueden congelarse una o varias ondas que pueden activarse simultáneamente y hacerlas interferir. Se puede definir como el estudio y aplicación de fenómenos interferenciales en los que por lo menos una de las ondas se ha reconstruido holográficamente.

Sobre la base de los trabajos de Gabor se introdujeron en 1965 los principios de la Interferometría Holográfica. Los investigadores del grupo de Óptica de la Universidad de Michigan, Kart Stetson y Robert Powell aplicaban la técnica al análisis y evaluación de vibraciones de objetos difusores (15). J.M. Burch, L.O. Heflinger y R. F. Wuerker introducen la técnica de doble exposición y la interferometría a tiempo real y K.A. Haines y B. P. Hildebrand estudian deformaciones y desplazamientos de objetos de reflexión difusa (16).

Estas aportaciones fueron seguidas de una gran actividad. La teoría fue refinada y el mayor énfasis de la investigación se dedicó a la interpretación cuantitativa de los interferogramas y a la adecuación de láseres pulsantes a la holografía. En el Congreso Internacional sobre aplicaciones de la Holografía de Besançon en 1970, la interferometría ocupaba seis de sus sesiones con cuarenta y un trabajos de aplicación al estudio de deformaciones, tensiones, vibraciones, fluidos y plasmas, constituyendo una de las facetas de mayor interés del congreso.

Para destacar las diferencias entre la interferometría clásica y la holográfica analicemos la situación en el caso en que las dos pueden utilizarse de forma competitiva. En un interferómetro clásico, como es el Mach-Zehnder, se pueden medir diferencias de camino óptico que introduce un objeto transparente situado en uno de los brazos del interferómetro, con una onda de referencia plana en el otro brazo, dando lugar a una figura interferencial. La calidad óptica de los elementos que constituyen el interferómetro y los que limitan el medio en estudio deben ser tales que no enmascaren el efecto del objeto, pues ello daría lugar a interferogramas difíciles de interpretar. En los elementos de cualquier interferómetro clásico se necesita una calidad óptica mejor que una décima de longitud de onda, lo que limita sus posibilidades de aplicación.

La interferometría holográfica que mayor similitud tiene con la convencional es la interferometría a tiempo real. Un dispositivo práctico consiste en un interferómetro Mach-Zehnder en el que se ha sustituido la placa mezcladora por un holograma. En la placa se registra un estado inicial del objeto en estudio, se procesa adecuadamente y se construye un holograma, preferentemente de volumen y fase, que se restituye a su posición original. Iluminando el holograma con la onda objeto se restituye la onda de referencia plana, y, si se ilumina con la onda modificada, la onda restituida lleva información de las variaciones producidas. Es decir, el holograma cancela los errores de fase que introducía el objeto

original y permite la utilización de dispositivos sin calidad óptica (16).

Cuando se analiza un interferograma sólo pueden determinarse con alta precisión los puntos del campo con interferencia constructiva (máximos). Se han ideado procedimientos para aumentar la precisión. Un método es el de "amplificación de fase": si se hace trabajar una placa en zona no lineal se puede conseguir que en la reconstrucción se produzcan ondas correspondientes a órdenes superiores al primero. Esta posibilidad fue apuntada por Gabor en 1948, y veinte años después Bryngdahl y Lohmann (17) la utilizaron para efectuar la amplificación de fase.

En 1979, Endo, Matsuda y Tonomura utilizaron la técnica anterior en hologramas formados con haces de electrones. Emplearon un biprisma de electrones del tipo de Mollensted para generar hologramas con haz de referencia fuera de eje. La técnica les permitió poner de manifiesto el carácter tridimensional de finas partículas poliédricas de Berilio (18).

Los primeros trabajos sobre interferometría holográfica en iluminación difusa tendieron a mostrar sus posibilidades cualitativamente. Cuando se observa un interferograma efectuado con luz difusa, las franjas de interferencia aparecen localizadas en el espacio sobre superficies próximas al objeto. Para estas superficies la variación de diferencia de caminos ópticos es mínima en diferentes direcciones de observación. La situación es análoga a la que se encuentra en interferometría clásica en iluminación con fuente extensa, pero el motivo es diferente.

Cuando se mira una superficie difusora, iluminada con luz coherente, se aprecia el moteado láser que da cuenta de las microfluctuaciones en la fase causadas por la rugosidad microscópica. El tratamiento estadístico efectuado por Goodman, Walles y Tanner (16) permite establecer que los fenómenos de interferencias sólo son observables si se superponen luces provenientes de puntos con la misma distribución microscópica de las irregularidades, de aquí el carácter único de la interferometría holográfica. Esta conclusión simplifica notablemente la interpretación de los interferogramas mediante la introducción del concepto de rayos homólogos: solamente haces provenientes de los mismos puntos (antes y después de la modificación) son capaces de formar franjas de interferencia que modulan el moteado de alta frecuencia en la imagen.

La interferometría holográfica permite la aplicación de los métodos interferométricos al estudio de objetos sin calidad óptica, pudiendo medir desplazamientos y deformaciones de objetos difusores con una precisión de fracciones de longitud de onda.

En un principio se utilizaron para el registro de las ondas películas holográficas. Hoy en día se ha introducido el concepto de holografía digital que se fundamenta en la aplicación de las matrices CCD (charged coupled devices) en el registro de hologramas (19) y la

reconstrucción de las ondas se efectúa numéricamente con ordenador.

Estos métodos de registro y reconstrucción han dado un nuevo impulso a la holografía y constituyen un motivo de investigación actual (20).

La interferometría holográfica se utiliza en los procesos de control de fabricación industrial, en el estudio de fenómenos periódicos, en microscopía y en prácticamente cualquier rama de la ciencia, tanto en observación cualitativa como en medida cuantitativa de desplazamientos y deformaciones.

8. MEMORIAS ÓPTICAS HOLOGRÁFICAS

La consecución del registro de varias imágenes en un solo holograma realizada por Leith y Upatnieks (10), lleva implícita la capacidad de utilización como memoria óptica de los hologramas. La idea de utilizar hologramas para el almacenamiento de datos en tres dimensiones fue propuesta en 1963 por Pieter J. van Heerden, de Polaroid.

La multiplexación de imágenes en un solo holograma, utilizando la selectividad angular de los hologramas de volumen, permiten densidades de almacenamiento del orden de Tbit/cm³ (21). Los dispositivos alcanzan velocidades de transferencia superiores a 1 Gbit/s y una selección de datos de menos de cien microsegundos. Ninguna otra técnica de memorias es capaz de ofrecer simultáneamente estas tres ventajas y se encuentra tan próxima a la comercialización (22).

Estas ventajas, junto a los avances en las pantallas de cristal líquido (LCD) y en las matrices de detectores de estado sólido (chips CCD), adecuados para dispositivos de almacenamiento holográfico de datos, han motivado el interés de empresas como IBM y de grupos de investigadores universitarios, relanzando la investigación en estos medios.

En 1994 se constituyó un consorcio entre compañías y grupos de investigación universitarios con el fin de analizar la capacidad de almacenamiento holográfico de materiales fotorrefractivos que se denominó PRISM ("photorefractive information storage materials"). La piedra angular de este programa fue el desarrollo y construcción de un complejo dispositivo de prueba por IBM (23), que terminó tomando el nombre del consorcio para el tester, "PRISM". Se puede medir la probabilidad de error del medio (BER) y la relación entre el número de hologramas registrables y la eficiencia a la difracción $M\#$ (número M), que depende de las propiedades del material holográfico y del sistema óptico.

De los materiales más productivos, desde el punto de vista de la investigación, se encuentran los cristales fotorrefractivos. De estos, el niobato de litio dopado con hierro se ha utilizado para fines demostrativos en almacenamiento holográfico de información. Un número M ($M\#$) alto conlleva una mejora en el comportamiento del sistema de registro y

lectura incluyendo el material, pero el niobato de litio tiene el problema para aplicaciones prácticas de que se produce un borrado parcial durante el proceso de lectura.

Los fotopolímeros orgánicos son prometedores como medios irreversibles de almacenamiento. Pueden ser muy sensibles, permiten escritura rápida, con buen rango dinámico y un número M mayor que diez. Uno de los problemas que presentan es la dificultad de hacer láminas con espesor mayor que una fracción de milímetro, además de la distorsión causada por el engrosamiento del material en la polimerización (24).

Para evitar el borrado durante la lectura se ha propuesto el registro con dos longitudes de onda, una para sensibilizar el material y otra para el registro de lectura de la información. En ausencia de la primera radiación el medio es insensible, permitiendo la lectura a la misma longitud de onda con que fue registrada la información (24) sin destrucción de ésta.

Se han analizado y obtenido algunos materiales prometedores como medios de registro, y alguno ya se ha utilizado como memoria óptica no borrrable.

En 1995 la compañía Holoplex anunció la aplicación de un aparato con memoria holográfica para la identificación de huellas digitales. Los hologramas se registraron en un medio polimérico, y un conjunto de hasta cien huellas digitales pueden compararse en un segundo. Este dispositivo se ha utilizado como llave de entrada en instalaciones de alta seguridad (24).

En abril de 2007 la empresa In Phase presentaba los primeros prototipos de almacenamiento holográfico y mostraba discos comerciales holográficos con una capacidad de almacenamiento de 300 Gbit, equivalente a más de sesenta DVDs en un solo disco, y con una velocidad de transferencia de datos de 200 Mbit/s (6).

Que esta tecnología se aplique a las memorias de los futuros ordenadores producidos industrialmente depende del éxito de nuevos materiales de registro. Tienen que poscer gran capacidad de almacenamiento, alta sensibilidad acompañada de tiempos de lectura y grabado muy cortos, baja volatilidad (es deseable años de utilización), amplio rango dinámico y reversibilidad, estar libres de deformaciones en el proceso de grabado y muy baja relación de error.

9. APLICACIONES Y APORTACIONES A LA HOLOGRAFÍA DESARROLLADAS POR NUESTRO GRUPO

9.1. *Reconstrucción holográfica del frente de onda*

La función de transferencia óptica (O.T.F.) se puede expresar como la autocorrelación normalizada de la función pupila. Para valorar la O.T.F. se emplean, entre otros, métodos interferenciales. Se mide el flujo de energía en la figura interferencial de dos frentes de ondas idénticos desplazados y desfasados, con un desfase función lineal del desplazamiento.

Françon y colaboradores (25) sugieren en 1966 un método para medir la (M.T.F.) basado en la interferometría holográfica. Dos años más tarde, Matsumoto y Ose (26) aplican este método a una función pupila generada por un filtro espacial de fase.

En nuestro laboratorio se puso a punto un sistema (27) que permitía valorar, por interferometría holográfica, la medida de la M.T.F. de un sistema óptico. Se hizo un tarado del método utilizando un sistema óptico de parámetros conocidos, y los resultados fueron acordes con las previsiones teóricas. El método nos permitió también medir con precisión la aberración de onda utilizando dos hologramas idénticos, donde uno reconstruye el frente de onda y el otro el conjugado.

Podíamos, por tanto, medir dos respuestas que caracterizan las propiedades y calidad de un sistema óptico, por una parte el comportamiento y la respuesta en frecuencias espaciales del sistema y por otra la medida de la aberración de onda.

En estudios realizados por J. Casas, en la Universidad de Zaragoza (28), se establecieron algunos criterios respecto a la mejor imagen visual en presencia de aberraciones. Toma como referencia las posiciones de las focales sagital y tangencial para diferentes puntos del campo, posiciones que caracterizan el sistema ya construido.

La aplicación de las técnicas antes reseñadas nos dieron criterios para la previsión de las correcciones en sistemas de visión directa, en casos de bajas aberraciones. No resulta tan predecible el comportamiento con aberración comática alta.

9.2. *Lentes holográficas eficientes con aberraciones limitadas*

Una tarea que nos ha ocupado, durante un periodo largo de tiempo, ha sido el diseño y construcción de elementos holográficos. Muchos han sido los investigadores que se han dedicado a esta tarea y han mostrado la estrecha analogía entre las lentes holográficas y refractoras.

Hemos utilizado la técnica de igualación del frente de onda para obtener los coeficientes de aberración, en todo análogos a los de los sistemas ópticos refractores.

Una constante en el desarrollo de estos trabajos ha sido considerar que las redes superficiales controlan la dirección de los rayos y las redes internas (de volumen) la eficiencia. No quiero dejar pasar la oportunidad de nombrar el trabajo de H. Kogelnik sobre "La teoría de ondas acopladas para redes de difracción gruesas" (29), que suministra un marco teórico a la comprensión de los problemas de difracción en los hologramas.

Las lentes holográficas tienen una característica importante: cuando la fuente puntual de reconstrucción se sitúa en la posición de punto objeto de construcción las aberraciones son estrictamente nulas, sin importar el tamaño del holograma. Pero tienen una desventaja, y es que, por lo general, las aberraciones crecen de forma intolerable cuando el punto objeto se aparta del de construcción de la lente holográfica.

En un trabajo (30), demostramos que podían utilizarse las propiedades de selectividad angular de los hologramas de volumen para limitar las aberraciones y aumentar el campo útil, mediante la multiplexación de lentes en una misma placa. Las dificultades técnicas de construcción hacen poco viables estos elementos ópticos como elementos holográficos biaxiales.

Los mejores resultados, respecto a la modulación del camino óptico, se consiguieron con el blanqueo mediante atmósfera de bromo. Se pudieron multiplexar hasta cuatro lentes de alta eficiencia en una misma placa holográfica. Se emplearon placas de la casa AGFA-Gevaert que, durante un largo periodo de tiempo, fueron los productores principales de placas holográficas en Europa.

Hemos indicado que las aberraciones de punto en las lentes holográficas crecen cuando las condiciones de iluminación se apartan de las de construcción. Se realizó un análisis del comportamiento de diferentes tipos de lentes (31) tomando como criterio la determinación de la aberración de onda en función de los parámetros de construcción.

Este estudio se completó (32) analizando los diagramas de impacto para diferentes puntos del campo. Las predicciones del tercer orden, tanto para las aberraciones de onda como para las transversales de rayo, describen correctamente el comportamiento de los sistemas holográficos, para ángulos de los ejes respecto a la normal de hasta unos 20° .

Se hizo notar que los sistemas biaxiales presentan unas aberraciones muy altas y que, salvo que las geometrías de construcción y reconstrucción permitan cancelar algún término de aberración, son poco utilizables como sistemas formadores de imágenes (32).

Concluimos que respecto a las aberraciones el mejor comportamiento lo dan las lentes uniaxiales. No obstante, como la frecuencia espacial en el centro de la lente es nula, no hay efecto de volumen y tales lentes se comportan como hologramas delgados con baja eficiencia de difracción.

Hemos realizado un sistema de dos lentes pegadas que se comportan como un sistema uniaxial y que, a los efectos de formación de imagen, son equivalentes a una lente simple. Esto permite obtener sistemas que conjugan la elevada eficiencia de las lentes biaxiales con las menores aberraciones de las lentes uniaxiales. Estos sistemas presentan una característica, tienen una selectividad angular alta en el plano de simetría (32).

Para reducir el problema de la selectividad angular en sistemas de campo amplio, se recurrió a registrar lentes holográficas en dos secciones de la placa de la misma área y con direcciones de selectividad máxima a noventa grados (35). La construcción es sencilla y el resultado es aceptable, aunque la luminosidad en el plano imagen disminuye a la mitad fuera del campo común.

Se han diseñado lentes compuestas, con cuatro lentes biaxiales, que permiten aumentar el campo y mantener las aberraciones en tolerancia, por comportarse como un sistema axial centrado. La eficiencia no es del cien por cien a causa de la limitación en la modulación del índice de refracción (35).

Una solución más simple y elegante fue el diseño, estudio y construcción de lo que denominamos "lentes holográficas uniaxiales de campo compartido". Estas lentes cumplen la condición de dar todas y cada una la misma imagen, pues la frecuencia de la red equivalente es la misma en el centro de la placa holográfica, y se regulan las aberraciones con la selectividad angular (36). La mayor limitación en la eficiencia la da el no tener materiales de registro con alto rango dinámico en la modulación del camino óptico.

En estos momentos se ha conseguido, en placas de gelatina dicromatada, obtener redes de alta eficiencia, alto cociente señal ruido, y capaces de admitir la multiplexación de redes holográficas de volumen de alta eficiencia (37). Esto ha permitido la construcción de lentes de campo compartido de muy alta eficiencia y con limitación en las aberraciones.

El principio de utilizar dos hologramas de volumen y fase para realizar un sistema equivalente a un holograma en eje, no solo se ha empleado para realizar lentes en eje muy eficientes, también ha sido una herramienta muy útil en muchas soluciones para conformar frentes de onda de interés.

9.3. Lentes anamórficas

Las lentes cilíndricas y esferocilíndricas son sistemas sencillos, con propiedades especiales. La versatilidad alcanzada en la realización de lentes holográficas de alta eficiencia nos llevó a estudiar y construir lentes holográficas anamórficas (36). Se aplicaron a la construcción de procesadores ópticos que realizan la transformada de Fourier multi-canal en iluminación monocromática.

Se propusieron dos procesadores anamórficos y acromáticos que permitieron realizar el filtrado en el plano de Fourier común, y producir la imagen filtrada en el plano de salida para todas las longitudes de onda simultáneamente.

Hemos utilizado el procesador anamórfico y acromático, iluminando con luz blanca, para analizar las fotografías resultado de un trabajo de velocimetría de imagen de partículas. Estas fotografías permitieron obtener el mapa de velocidades de un fluido en un proceso convectivo de Rayleigh Bénard (36).

9.4. *Interferometría holográfica*

Una de las facetas más interesante de la holografía, desde el punto de vista técnico, ha sido extender los métodos interferométricos a medios sin calidad óptica y suministrar un método para contrarrestar los efectos de medios con altas deformaciones de frentes de onda.

Para estudiar la respuesta de placas holográficas con distintos procedimientos de blanqueo, se diseñó y construyó un interferómetro Mach-Zehnder holográfico (30), en el que la lámina mezcladora se sustituyó por un holograma que corrige las aberraciones introducidas por los diferentes elementos ópticos que forman parte del interferómetro. De los procedimientos de blanqueo, el más eficiente fue el propuesto por Graube de inmersión en atmósfera de bromo (30).

Es bien conocida la técnica de moteado de partículas para el estudio de la mecánica de fluidos (38). En esta técnica se hace un sembrado de partículas en el fluido que se ilumina por un haz de luz laminar, de forma que se consigue una superficie gruesa que difunde luz láser, como ocurre en las superficies rugosas de los sólidos. Por ello, se entiende que pueden aplicarse a los fluidos las técnicas de interferometría holográfica desarrollada para los sólidos (39).

Es posible medir diferentes componentes de la velocidad del fluido, utilizando varios puntos del holograma para la reproducción de los interferogramas, ya que al cambiar el vector sensibilidad se obtiene la componente de la velocidad sobre dicho vector. Utilizando una lente de campo sobre el plano de reconstrucción de la imagen real, se obtiene sobre el sensor de una cámara digital el interferograma sin deformación, cualquiera que sea la iluminación sobre los diferentes puntos del holograma.

Una técnica automática de procesado de los interferogramas permite el análisis de éstos, y de la combinación de datos se obtienen las componentes del vector velocidad. Se utilizó esta técnica para estudiar un flujo convectivo de Rayleigh-Bénard.

La técnica de interferometría holográfica se aplicó a experiencias en un tunel de viento

para medir el campo de velocidades (40). Se propuso la combinación de la técnica de velocimetría de imagen de partículas con la interferometría holográfica para medir las tres componentes de la velocidad: la primera da alta precisión para las componentes en el plano de iluminación, y la segunda para la componente perpendicular a dicho plano.

Del registro de un solo holograma, combinando dos técnicas de reconstrucción diferentes, se puede obtener información cuantitativa de los tres componentes de la velocidad en un plano del fluido. Esta técnica, que hemos denominado interferometría holográfica dual, constituye una forma nueva de medir los tres componentes del desplazamiento y puede realizarse del estudio de un holograma con dos exposiciones o aumentar la precisión registrando tres exposiciones (41).

9.5. *Filtros y sistemas con elementos holográficos*

El hecho de que la eficiencia de un holograma de volumen y fase, registrado en una disposición simétrica, dependa de la modulación del índice de refracción y ésta de la exposición, nos permitió proponer y construir un filtro holográfico que transforma un haz de perfil gaussiano en uno de perfil uniforme.

El método de construcción es sencillo; utiliza el perfil gaussiano de la mayoría de los haces láser para realizar una exposición no uniforme, y por lo tanto de una eficiencia variable. A causa de ello, al iluminar con un haz gaussiano, el haz transmitido es uniforme (30). Este filtro puede realizarse en cualquier laboratorio holográfico y tiene la ventaja adicional, frente a otros filtros, de que no absorbe la energía.

Las lentes difractivas tienen una alta aberración cromática que aprovechamos para el diseño y construcción de un monocromador focal. Se empleó uno de los sistemas de dos lentes pegadas, con comportamiento de lente uniaxial que funcionó como sistema de aumento unidad con alta luminosidad, buen poder resolutivo y fácil calibrado (33).

Otro sistema holográfico que hemos construido, basado en los hologramas de volumen y fase, es un elemento dual que se comporta como un divisor de haz de amplitud variable. Este sistema es muy sensible a las posiciones relativas de los dos hologramas que lo conforman (34).

Se ha construido un sistema óptico formado por dos lentes biaxiales idénticas, que se comporta como uniaxial, y se ha utilizado como objetivo de una cámara de vídeo con pantalla de captura CCD. Se consiguió una configuración que elimina las aberraciones de las láminas soporte de la emulsión. Se ha determinado que, para un semicampo de hasta dos grados y de apertura $f: 8,5$, el sistema opera dentro del límite de resolución del detector CCD. Colocando delante del objetivo un filtro interferencial apropiado, se

lograron fotografías de objetos a gran distancia iluminados con luz blanca y con una calidad análoga a objetivos refractores comerciales (32).

9.6. Memorias holográficas

La aportación más singular realizada fue propuesta dentro de un acuerdo con la División de Investigación de I.B.M. en el Centro de Investigación de Almaden (California), denominada "Optimización en registro y lectura de almacenamiento holográfico de datos". El Dr. Hans Coufal propuso el tema, que fue llevado a buen término por la entonces doctorando Doña M Pilar Bernal, constituyendo su Tesis Doctoral por la Universidad de Zaragoza (42).

Fue una ocasión excepcional que nos permitió compartir y aprender de un trabajo de élite, del que sobre todo tengo que agradecer la confianza que mostraron. Seguí su realización con entusiasmo y prontitud, discutiendo el procedimiento, analizando los resultados y sugiriendo métodos para atacar el cálculo de previsiones teóricas. Recibí más de lo que aporté y mi nombre aparece en los trabajos a los que dio lugar. Por ello me siento orgulloso de figurar junto a un equipo que tanto renombre tiene en la investigación científica.

9.7. Hogramas para el conformado de pulsos de láseres de alta potencia

La colaboración con el Departamento de Física Aplicada en la Universidad de Salamanca nos ha llevado a la propuesta y construcción de hologramas de volumen y fase para la generación de vórtices de alta potencia.

La utilización de emulsiones Slavich PFG-04 en la construcción de redes holográficas, nos ha permitido el diseño y montaje de un compresor de pulsos para compensar la dispersión de segundo orden de láseres de femtosegundos.

La técnica de utilización de dos hologramas de volumen y fase, para conseguir sistemas que operan como uno simple en eje de alta eficiencia, se emplea en la consecución de vórtices de alta energía evitando la dispersión cromática lateral de redes biaxiales.

Quiero manifestar mi agradecimiento a todos aquellos que, con su confianza, esfuerzo y dedicación, me permitieron ser partícipe en esta etapa del desarrollo de la holografía. No hubiese sido posible sin su valiosa ayuda y su eficaz empuje durante el desarrollo de los diferentes trabajos.

Por último, a todos los presentes muchas gracias por su atención.

Referencias

- [1] Holography, 1948-1971. Nobel Lectura, December 11, 1971 by Dennis Gabor. Imperial Colleges of Science and Technology, London
- [2] Holography. (For the new millennium). Jacques Ludman, H. John Caulfield, Juanita Riccobono (editors). Springer (2002)
- [3] A new microscopic principle. D. Gabor. Nature n 498, May 15 (1948) Microscopy by reconstructed wave-fronts. D. Gabor. Proc. Roy. Soc. A 197 (1949) Microscopy by reconstructed wave-fronts: II. D. Gabor. Proc. Phys. Soc. LXIV, 6-B, 1 June (1951)
- [4] Principles of Optics, M. Born and E. Wolf. Pergamon Press (1959), pág. 453
- [5] An Introduction to Coherent Optics and Holography. George W. Stroke. Academic Press (1966)
- [6] Univ. de Alicante. Lección Inaugural Curso Académico 2007-2008. Holografía: ciencia, arte y tecnología. Por Augusto Meléndez Vázquez
- [7] Cutrona, L. J., Leith E. N., Porcello, L. J. and Vivian, W. E., "On the Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic Aperture Radar", Proc. IEEE, 54, 1026-1032 (1966)
- [8] H. Jensen, L. C. Grahman, L. J. Porcello y E. Leith. Radar de Imágenes laterales Aerotransportado, 15, 52-65 (1977). Investigación y Ciencia
- [9] E. N. Leith y J. Upatnieks. "Wavefront reconstruction with continuous tone objects", Journal of the Optical Society of America, Vol. 53, 1377-1381 (1963)
- [10] Emmett N. Leith and Juris Upatnieks. "Photography by Laser". Scientific American 212, n 6, 24-33 (Junio 1965)
- [11] Proceeding of the 7th International Symposium on Display Holography (2006) River Valley Press. "Yuri Denisyuk: An appreciation". Sean F. Johnston (8-13)
- [12] Yu N. Denisyuk. On reflection of the optical properties of an object in wavefield of radiation scattered by it, Optika I Spektroskopija 15, 522-532 (1963)
- [13] Applications de l'Holographie. Comptes Rendus du Symposium International. Besançon, (juillet 1970) France. Edité par J. Ch. Viénot, J. Bulabois, J. Pasteur.
- [14] S. A. Benton, "Rainbow holograms", Journal of the Optical Society of America, Vol. 52, 1545-156 (1969)
- [15] K. A. Stetson and R. L. Powell, Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects" J.O.S.A., Vol. 55, 1694-1695 (1965)

- [16] Charles M. Vest. "Holographic Interferometry". John Wiley and Sons (New York) 1979
- [17] O. Bryngdahl and A. Lohmann. Nonlinear effects in holography. *J. Opt. Soc. Am.* 58, 1325-1334 (1968)
- [18] Laser Speckle, and related Phenomena. Edit: J. C. Dainty. Springer-Verlag (1975) J. Endo, T. Matsuda, A Tomura. Interference electron microscopy by means of holography. *Jpn J. Appl. Phys.* 18, 2291 (1979)
- [19] Handbook of Holographic Interferometry. Optical and Digital Methods. Tomas Ktreis. Wiley-VCH (2005)
- [20] Digital Holography and Three-Dimensional Display. Principles and Applications. Editor: Ting-Chung Poon. Springer (2006)
- [21] P. J. Van Heerden, "Theory of optical information storage in solids", *Applied Optics*, Vol. 2, 393-400 (1963)
- [22] Memorias holográficas. Demetri Psaltis y Fai Mok. *Investigación y Ciencia*, 42-49, enero (1996)
- [23] M. P. Bernal, H. Coufal, R. K. Crygier, J. A. Hooffnagle, C.M. Jefferson, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox and G. Wittmann, "A precision tester for studies of holographic optical storage materials and recording physics". *Appl. Opt.*, 35, 2360-2374 (1996)
- [24] Holographic Data Storage (Edit). Hans J. Coufal, Demetri Psaltis, Glenn T. Sincerbox. Springer (2000)
- [25] M. Françon, S. Lowenthal, M. May and R. Prat. *C. R. Acad. Sc. Paris*: 263, 237 (1966). M. May, *Optica Acta*, 16, 569 (1969)
- [26] K. Matsumoto and T. Ose, *Japanessa Journal of Applied Physics*, 7, 621 (1968)
- [27] I. Arias Tobalina. Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral, junio de 1977, "Aportación a la medida por interferometría holográfica del M. F. T. y de la aberración de onda"
- [28] J. Casas, F. Merino y S. Valdés, *An. Real Soc. Esp. Fis. Y Quim.* (1061) serie A, 57, 231 (1961)
- [29] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings", *Bell Syst. Tech. J.* 48, 2909 (1969)
- [30] Angel M. de Frutos Baraja. Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral, octubre 1982, "Aportación al diseño y construcción de elementos ópticos utilizando hologramas de volumen y fase"

- [31] M. Quintanilla, I. Arias. "Holographic imaging lenses. Composite lens with high efficiency", *J. Optics (Paris)*, 21, n 2 pp 67-72 (1990)
- [32] Jesús Atencia Carrizo. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Enero 1996 "Desarrollo de sistemas y lentes holográficas"
- [33] M. Quintanilla, J. Tornos. "Focal monochromator with holographic composite lens". *Opt. Pura y Aplicada*, 19, 159-167 (1986)
- [34] Alfonso Blesa Gascón. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Enero 1996 "Desarrollo de elementos ópticos holográficos de propósito específico"
- [35] Ana María López. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Marzo de 2001, "Estudio de la difracción cónica y aplicación al diseño de polarizadores y lentes holográficas"
- [36] María Victoria Collados. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Marzo de 2006, "Lentes holográficas para procesadores ópticos acromáticos y anamórficos"
- [37] Ayalid Villamarín, J. Atencia, M. V. Collados y M. Quintanilla. "Characterization of transmission volume holographic gratings recorded in Slavich PFG 04 dichromated gelatin plates". *Applied Optics*, 48, 4348-4353, August (2009)
- [38] María Pilar Arroyo de Grandes. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Mayo 1987 "Estudio de flujos convectivos Rayleigh-Benard por el método de moteado láser"
- [39] Nieves Andrés Gimeno. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Septiembre de 1994. "Aplicación de la interferometría holográfica y la velocimetría de imagen de partículas al estudio de flujos convectivos"
- [40] N. Andrés, M. P. Arroyo, H. Hinrichs, K. Hinsch, M. Quintanilla. Measuring velocity fields in wind tunnels with holographic interferometry. *Experiments in Fluids* 30, 117-122 (2001)
- [41] J. Lobera, N. Andrés, M. P. Arroyo and M. Quintanilla. Dual holographic interferometry for measuring the three velocity components in a fluid plane. *Applied Optics*, 43, 3535-3542 (2004)
- [42] María Pilar Bernal Artajona. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Septiembre 1998, "Optimización en registro y lectura de almacenamiento holográfico de datos"

DISCURSO DE CONTESTACIÓN

POR EL

Ilmo. Sr. Don MIGUEL ÁNGEL REBOLLEDO SANZ

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. e Ilmos. Sres. Académicos y Autoridades,
Señoras y Señores:

Ingresa hoy en nuestra Academia el Profesor D. Manuel Quintanilla Montón. Como es bien conocido, su ingreso tardío no es debido a falta de mérito por su parte, sino a que ha tardado veinticinco años en decidirse a presentar su discurso de ingreso, posiblemente para celebrar las bodas de plata de su nombramiento. Me ha correspondido la tarea de contestar al discurso de ingreso del que primero fue mi profesor, después un buen compañero y finalmente un magnífico amigo. Me siento por ello muy honrado, aunque un tanto abrumado por la responsabilidad que supone hablar sobre una persona con una calidad científica y humana como la que él ha demostrado.

Manuel Quintanilla Montón nació en Tarazona en 1937. Llevó a cabo los estudios de Licenciatura en Ciencias Físicas en la Universidad de Zaragoza, finalizando en 1959 con la calificación de Premio Extraordinario. Comenzó a trabajar bajo la dirección del Profesor D. Justiniano Casas Peláez en separación de isótopos por difusión térmica. Los contactos establecidos con el Instituto de Química Física de la Universidad de Zúrich le permitieron realizar una estancia de año y medio en dicho centro. Allí llevó a cabo la parte experimental de su trabajo doctoral (dirigido por el Profesor Casas de la Universidad de Zaragoza y por el Profesor Clusius de la Universidad de Zúrich) que versó sobre la medida de coeficientes de difusión térmica en moléculas isotópico-isobáricas del metano y que obtuvo, en 1963, la calificación de Sobresaliente cum Laude y Premio Extraordinario.

Los conocimientos adquiridos le permitieron participar, de forma muy activa, en la etapa final de la construcción y puesta a punto de un espectrómetro de masas en la Universidad de Zaragoza, que supuso un logro científico de gran importancia para la física experimental española del momento. Su participación directa en los trabajos de separación de isótopos por termodifusión se extendió hasta el año 1967 (un año antes de conseguir su plaza de Profesor Agregado Numerario en la Universidad de Zaragoza).

Llegó entonces para el Profesor Quintanilla lo que suele ser habitual en un científico: el cambio de tema de trabajo. Inició entonces sus trabajos de investigación sobre diseño y análisis de instrumentos ópticos, al que dedicó muchos años de su vida. Al poco tiempo, en 1971, le ocurrió lo que antes era habitual en un profesor: tuvo que trasladarse a otra Universidad (y comenzar de nuevo) al haber obtenido una Cátedra de Óptica y Estructura de la Materia.

Su nuevo comienzo tuvo lugar en la Universidad de Valladolid, con unos amplios espacios vacíos, ausencia de medios técnicos y la compañía de su doctorando (Santiago Mar Sardaña) que ahora es Catedrático en dicha Universidad. El Profesor Quintanilla siguió investigando en su último tema de trabajo (que estaba relacionado con la óptica) pero, en coherencia con la otra parte del título de su Cátedra (estructura de la materia), comenzó a trabajar en espectroscopía de plasmas. Posteriormente consiguió conectar ambos temas cuando inició su trabajo en holografía y la aplicó al diagnóstico de plasmas. Cuando, al cabo de diez años, el Profesor Quintanilla se trasladó a la Universidad de Zaragoza, en la Universidad de Valladolid se había transformado e incrementado la docencia de la óptica y se habían creado los laboratorios de docencia de óptica y de física nuclear; se habían creado los laboratorios de investigación de "producción y medida de plasmas y de holografía, alrededor de los cuales un grupo de diez personas llevaban a cabo investigación de calidad con unas bases tan sólidas que han permitido al grupo seguir trabajando con éxito durante los casi treinta años que han transcurrido desde el traslado del Profesor Quintanilla.

A su vuelta a la Universidad de Zaragoza continuó con sus trabajos de investigación en holografía. Por una parte, inició una colaboración en la investigación que llevaba a cabo el Profesor Savirón sobre dinámica de fluidos, aplicando técnicas de diagnóstico óptico, que derivó en el desarrollo de una línea de trabajo sobre técnicas holográficas de diagnóstico en fluidos. Por otra parte, inició sus trabajos sobre diseño y construcción de componentes y dispositivos holográficos para distintas aplicaciones. Estas han sido sus líneas trabajo hasta el presente.

El trabajo científico citado ha dado lugar a un nutrido número de publicaciones y a trece tesis doctorales dirigidas por él. Afortunadamente, su actividad no ha cesado con la jubilación (que tuvo lugar en el año 2007) y, como Profesor Emérito, ha seguido con empeño su actividad científica, que ha sido reconocida por la Real Sociedad Española de Física y por la Sociedad Española de Óptica mediante sus nombramientos como socio de honor.

Como docente ha desempeñado también una labor extraordinaria. Las circunstancias que lo han rodeado lo han sometido a encargos docentes muy nutridos, que él ha sabido compatibilizar siempre con una docencia de calidad. Puedo dar fe de ello como ex-alumno

suyo. Como compañero de trabajo siempre ha estado dispuesto a ayudar a las personas que lo han necesitado sin importarle el tiempo que tuviese que emplear para ello. Además siempre ha estado implicado en aquellas tareas que han contribuido a mejorar la infraestructura docente e investigadora de su Departamento y, cuando ha considerado que podría ser de utilidad, se ha implicado en tareas de gestión a distintos niveles. Su tesón ha sido tal que ha conseguido hasta resultados contrarios a cualquier pronóstico. Como ejemplo quiero decir que, en una larga labor en el tiempo, consiguió convencer a sus compañeros del interés de solicitar la impartición de la Diplomatura de Óptica y Optometría. Al final nuestra convicción fue tal que, cuando la Universidad de Zaragoza decidió implantar los estudios, fuimos capaces de desempeñar con entusiasmo las tareas que nos correspondieron a cada uno.

Toda esta admirable labor del Profesor Quintanilla ha sido posible gracias a su tesón y su intensa dedicación al trabajo (bien conocida por su paciente esposa María Teresa) que le hacen merecedor del ingreso en nuestra Academia. Pero si con una sola palabra pretendiésemos definir al Profesor Quintanilla esta sería "exhaustivo. Siendo fiel a ella ha redactado su discurso de ingreso en esta Academia de forma que me ha dejado muy pocas posibilidades de contestarle sin repetir algo de lo que ya haya hablado él. Afortunadamente, la holografía ha suscitado mucho interés en ámbitos externos al suyo propio (tanto científicos como filosóficos) y se ha convertido en plataforma de lanzamiento de nuevas ideas. En particular y dentro del ámbito de la holografía cuántica, la correlación de fotones (a la que dediqué quince años de mi vida investigadora) puede llevar a cabo aportaciones interesantes al mundo de la holografía.

Uno de los temas al que se ha dedicado un gran esfuerzo en holografía ha sido el de la mejora del registro holográfico. A lo largo de los años se ha trabajado en la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales para registro. Se han estudiado emulsiones fotográficas, medios fotorrefractivos, fotopolímeros y otros materiales, tratando de conseguir alta sensibilidad energética, alta resolución espacial, rapidez en el registro y otras propiedades que permitan optimizar el registro holográfico. Pero la optimización del material de registro no es la única posibilidad que existe para mejorar el registro holográfico. Otra posibilidad es encontrar técnicas de registro diferentes que aporten mejoras. Vamos analizar este nuevo camino.

Para ello recordemos que, en un holograma, el registro de la distribución de intensidad originada por la interferencia entre el haz de referencia y la onda que proviene del objeto contiene información suficiente para la reconstrucción de esta onda. Más concretamente, la información está contenida en la función de correlación de segundo orden de los campos eléctricos de las ondas que interfieren. Es bien conocido que la información completa que transporta un haz de luz cualquiera está contenida en las funciones de auto-correlación

de todos los órdenes de su campo eléctrico. Pero no menos cierto es que, en general, la información que contienen estas funciones de auto-correlación tiene cierto grado de redundancia. Esto significa, por una parte, que no suelen ser necesarias todas ellas para describir el haz y, por otra parte, que la misma información puede estar contenida en funciones de auto-correlación de distintos órdenes. Por ejemplo, en un haz de luz caótica gaussiana (que es la luz emitida por las fuentes habituales y que está generada por un número muy grande de partículas) toda la información está contenida en la función de auto-correlación de segundo orden (o lo que es lo mismo en su transformada de Fourier, que coincide con el espectro del haz de luz) y basta con esta función para describir el haz de forma completa. No obstante la información se distribuye también, de forma redundante, en funciones de auto-correlación de órdenes superiores y podría obtenerse a partir de su medida. Un caso particular fácilmente medible es el de la función de auto-correlación de segundo orden de la intensidad del haz de luz, que es una función de auto-correlación de cuarto orden de su campo eléctrico. Su medida se ha revelado como una técnica muy fructífera denominada espectroscopía de correlación de fotones.

Como hemos visto anteriormente al analizar el registro de un holograma, la información completa está contenida en la función de correlación de segundo orden de los campos eléctricos que interfieren. Pero, por analogía con lo dicho anteriormente, la información debe estar también distribuida en las funciones de correlación de órdenes superiores. Basándonos en el éxito obtenido por la espectroscopía de correlación de fotones, podríamos tratar de obtener la información holográfica a partir de la función de correlación de intensidades de los dos haces de luz. En este caso, en lugar de hacer interferir primero los dos haces de luz y registrar su interferencia para producir el holograma, habría que registrar primero cada haz de luz, medir su correlación a partir de estos registros utilizando técnicas de coincidencia de fotones y guardar esta información holográfica en un ordenador para llevar a cabo posteriormente el proceso de reconstrucción. Por lo tanto el registro no se haría mediante los soportes clásicos sino mediante detectores fotoeléctricos sensibles a la posición o mediante matrices de fotodiodos. Con estos receptores se consigue una resolución inferior, por el momento, pero sus prestaciones en cuanto a sensibilidad y rapidez son muy superiores.

Para comprender la posibilidad de la correlación de fotones como técnica de registro holográfico vamos a analizar un experimento análogo sencillo como el de las rendijas de Young. Como sabemos, en este experimento la luz de una lámpara se focaliza sobre una rendija que sirve como fuente de luz que ilumina dos rendijas paralelas. Al otro lado de las rendijas se produce un fenómeno de interferencia de dos haces, debido a que las ondas de luz se dividen en dos caminos que atraviesan las dos rendijas, y se observa la distribución de intensidades originada. Analicemos ahora este fenómeno desde el punto de vista de los

fotones que salen de la fuente. La interferencia no puede ser debida a la superposición de dos fotones diferentes porque la fuente emite fotones que son incoherentes unos con otros. Por lo tanto está claro que la interferencia se origina a partir de cada uno de los fotones individuales y que son los campos eléctricos del mismo fotón los que, al atravesar las rendijas, se superponen e interfieren. Como la probabilidad de presencia del fotón en un punto concreto es proporcional al módulo al cuadrado del campo eléctrico en ese punto, la distribución de impactos de los fotones en el plano de observación reproduce la distribución de intensidades originada por el fenómeno interferencial. Si en lugar de registrar las interferencias de forma clásica quisiéramos registrarlas mediante la medida de la función de correlación de intensidades, en lugar de medir la distribución de impactos de los fotones deberíamos medir la probabilidad de que se produjesen impactos simultáneos en dos puntos diferentes para todos los pares de puntos posibles del plano de observación. Por lo tanto, en este caso estaríamos registrando un fenómeno de interferencia a dos fotones. El estudio teórico detallado de este fenómeno revela que, para que exista esta interferencia, no basta con que los dos fotones sean coherentes entre sí sino que es preciso que estén entrelazados.

Dos fotones están entrelazados cuando el proceso de interacción luz-materia que los genera impone ligaduras a los valores que tienen algunas magnitudes cuando se miden en un fotón o en el otro. Estas ligaduras se mantienen a lo largo de la propagación de los fotones, aunque estos lleguen a estar muy alejados, de forma que si una de las magnitudes entrelazadas se mide en uno de los fotones se conoce el valor que presentaría si se midiese en el otro. Resulta evidente que el entrelazamiento introduce correlación entre ambos fotones. En nuestro caso necesitamos que aparezca correlación entre las intensidades de los dos haces de fotones entrelazados. De los varios mecanismos que producen pares de fotones entrelazados me limitaré al que de forma casi exclusiva se ha estado utilizando durante los últimos años para estudiar el tema que nos ocupa. Me refiero a la emisión espontánea paramétrica con reducción de frecuencia, que se obtiene excitando de forma no resonante un cristal no lineal sin centro de simetría mediante un láser de bombeo. En este proceso un fotón de bombeo se convierte en un par de fotones cuya suma de energías es igual a la energía del fotón de bombeo y cuya suma de momentos lineales es igual al momento lineal del fotón de bombeo. Al salir los fotones de cada par en direcciones bien determinadas y separadas se obtienen dos haces (haz de señal y haz complementario) de fotones entrelazados que pueden manejarse como convenga. El entrelazamiento de las energías de los fotones de un par y el entrelazamiento de sus momentos lineales (que equivale a un entrelazamiento de sus direcciones de propagación) hacen que los haces de señal y complementario presenten correlación de intensidad, como se ha demostrado mediante estudios teóricos y experimentales.

Disponemos por tanto de una fuente luminosa adecuada para observar las interferencias en un montaje de rendijas de Young mediante la medida de la función de correlación de intensidades, siempre que este montaje se lleve a cabo en unas condiciones adecuadas que permitan obtener las interferencias con un buen factor de visibilidad. Recordemos que en el caso del montaje clásico, en el que se mide la distribución de intensidad, hace falta que el tamaño de la fuente iluminadora sea suficientemente pequeño como para que las dos rendijas sean iluminadas coherentemente. En caso contrario, los máximos y mínimos de interferencia producidos por fotones emitidos en distintos puntos de la rendija se enmascaran unos con otros y la visibilidad se degrada. En el caso de interferencias con fotones entrelazados hay que tener en cuenta que solamente existe correlación entre los fotones de un par cuando existe entrelazamiento entre los momentos lineales además del entrelazamiento entre las energías. Pero debido al principio de incertidumbre posición-momento si el tamaño de la fuente es pequeño la incertidumbre en la posición de los fotones emitidos es pequeña, lo que hace que la incertidumbre en sus momentos lineales sea grande y desaparezca el entrelazamiento entre ellos. Esto implica que el tamaño de la fuente (que viene regulada por el diámetro transversal del haz de bombeo) debe ser suficientemente grande como para obtener un buen entrelazamiento. Un análisis teórico más profundo demuestra que es el tamaño angular de la fuente (vista desde el plano de las rendijas) el parámetro que regula el entrelazamiento. Como consecuencia de esto aparece una complementariedad entre la coherencia espacial (que es precisa para observar interferencias a un fotón) y el entrelazamiento (que es preciso para observar interferencias a dos fotones) de forma que cuando se adecúa la fuente para optimizar la observación de uno de los fenómenos el otro es inobservable. Todo esto se ha verificado experimentalmente dirigiendo los haces de señal y complementario de una fuente de pares de fotones emitidos por emisión espontánea paramétrica con reducción de frecuencia hacia dos rendijas paralelas, mediante el uso de una lente. Utilizando un detector bidimensional de luz al otro lado de las rendijas se ha medido la distribución de intensidades y la función de correlación de intensidades. Para tamaños angulares de la fuente suficientemente grandes se ha encontrado una buena visibilidad en las interferencias detectadas midiendo correlación de intensidades y mala visibilidad en las detectadas midiendo el perfil de intensidad. Sin embargo, para tamaños angulares suficientemente pequeños de la fuente se ha encontrado lo contrario.

Los resultados anteriores, en perfecta concordancia con las predicciones de los modelos teóricos, demuestran que la información contenida en la interferencia de dos haces puede registrarse mediante medidas de correlación de intensidades siempre que los dos haces estén formados por fotones entrelazados. Como cada par de fotones entrelazados debe ser descrito mediante un estado cuántico, lo que significa que la interferencia entre los

dos fotones es una interferencia del estado cuántico consigo mismo, el estudio teórico de las correlaciones de intensidad hay que hacerlo mediante una descripción cuántica de los campos y por tanto de las correlaciones. La obligatoriedad del uso de fotones entrelazados para poder conseguir estas correlaciones conduce a ciertas ventajas que creo interesante analizar.

Es bien conocido que cuando se lleva a cabo un experimento de interferencia de dos haces obtenidos a partir de una fuente común (como ocurre en un interferómetro de Michelson o de Mach-Zehnder) solamente se obtienen interferencias apreciables cuando la diferencia entre los caminos ópticos de los dos haces es inferior a la longitud de coherencia de la luz emitida por la fuente. La consecuencia de esta realidad cuando se aplica a la interferencia entre el haz de luz que proviene del objeto y el haz de referencia, que tiene lugar en el registro holográfico clásico, es la limitación del tamaño del objeto que puede ser holografiado. Al llevar a cabo interferencias con los haces de señal y complementario provenientes de una fuente de fotones entrelazados como la que hemos descrito anteriormente, se encuentra que sigue habiendo correlación cuántica apreciable aunque la diferencia de caminos ópticos sea superior a la longitud de coherencia. Esto implica que la técnica de correlaciones cuánticas permite el holografiado de objetos mayores que la técnica clásica.

El experimento de rendijas de Young vuelve a darnos nueva luz cuando se miden en él las correlaciones cuánticas de formas diferentes. Si, en lugar de dirigir los dos haces de fotones entrelazados a las rendijas, se dirige solamente uno de ellos (el haz de señal por ejemplo) y se mide la correlación cuántica entre la luz de este haz que hay al otro lado de las rendijas y la luz del haz complementario, se detectan perfectamente las interferencias a dos fotones. Sin embargo las interferencias a un fotón producidas por las rendijas en el haz de señal son indetectables porque cuando los pares de fotones emitidos están entrelazados la anchura excesiva de la fuente los enmascara. Pero en realidad cada fotón del haz de señal está produciendo interferencias al otro lado de las rendijas, como hemos visto anteriormente. Por lo tanto, al correlacionarlo con su fotón entrelazado esta interferencia se manifiesta. Tenemos aquí un ejemplo de cómo la correlación cuántica manifiesta información que queda enmascarada para la correlación clásica debido a la incoherencia espacial.

Para entender otras ventajas adicionales es preciso recurrir a la técnica de tomografía óptica coherente, que es de gran utilidad en el análisis de muestras biológicas (fundamentalmente en oftalmología, cardiología y dermatología) y en el análisis de pinturas. La luz de una fuente de espectro muy ancho se divide en dos haces: haz de prueba y haz de referencia. La superposición de la luz del haz de prueba que se refleja en la muestra a observar y la luz del haz de referencia produce una estructura interferencial cuya inten-

sidad de pende de la cantidad de luz reflejada. La gran anchura espectral de la luz hace que las interferencias solamente aparezcan cuando la diferencia de los caminos ópticos de los dos haces es muy pequeña, lo que permite determinar con buena precisión la posición axial del punto del que proviene la luz reflejada que se está analizando. El control del camino óptico recorrido por el haz de referencia mediante el movimiento de un espejo hace que cambie la posición axial del punto de la muestra observado en cada momento. Esto, combinado con un barrido horizontal de la muestra, permite obtener una imagen tridimensional de la misma. En lugar de detectar la correlación clásica contenida en las interferencias se puede detectar la correlación cuántica. Tanto los modelos teóricos como los resultados experimentales conducen a dos ventajas de la correlación cuántica, debidas al uso de fotones entrelazados. En primer lugar, el uso de pares de fotones entrelazados origina una mejora en un factor dos de la resolución espacial en la imagen. En segundo lugar, el entrelazamiento hace que se cancelen los efectos de dispersión de la velocidad de grupo que ocurren cuando el haz de prueba atraviesa la muestra y que limitan la precisión en la medida de la posición en profundidad.

De todo lo expuesto anteriormente se desprende que el registro holográfico mediante correlaciones cuánticas debe permitir el holografado de objetos mayores, con una mejora de un factor dos en su resolución espacial y eliminando los defectos cromáticos que la dispersión del objeto podría originar, así como problemas originados por incoherencia espacial. Una vez analizadas estas ventajas, que podemos unir a las del método de registro expuesto anteriormente, solamente queda describir con algo más de detalle este método, que requiere la producción de dos haces de fotones entrelazados y el uso de uno de ellos como haz de referencia y del otro como iluminador del objeto a holografar. Aunque la obtención de la estadística de coincidencias entre los impactos de los fotones del haz de luz que proviene del objeto y los del haz de referencia sobre sendos detectores bidimensionales permite obtener la interferencia cuántica entre ambos, los modelos teóricos indican que este no es el método de registro idóneo si se quiere simplificar al máximo el proceso de reconstrucción. El método idóneo consiste en sustituir el detector bidimensional del haz que viene del objeto por un detector que registre los impactos de los fotones con independencia de su posición y medir la probabilidad marginal de registrar un impacto en este detector y un impacto en una posición determinada del detector bidimensional colocado en el haz de referencia. El funcionamiento óptimo de este método se obtiene si el detector del haz objeto rodea a dicho objeto, dejando un hueco para la entrada de la luz iluminadora. Este método ha sido utilizado con éxito en el registro y reconstrucción de imágenes bidimensionales (llamadas imágenes cuánticas) y en el registro y reconstrucción holográfica tanto de objetos de variación de amplitud como de variación de fase.

Lo expuesto hasta aquí es un ejemplo del interés que ha suscitado la holografía en

temas candentes de la física actual. A pesar de ello yo no creo que la holografía sea importante por esto. Creo que es importante porque personas como el Profesor Quintanilla han dedicado un gran esfuerzo para que la holografía exista y sea útil y ese esfuerzo los hace merecedores de nuestro reconocimiento. Por ello y cumpliendo la misión que me ha sido encomendada, tengo el placer de concluir mi discurso diciendo: Profesor Quintanilla, querido amigo, bienvenido a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza como Académico Numerario. He dicho.