

HOLOGRAFIA

Michel Valero
Profesor Depto. de Física

RESUMEN

Se presenta aquí una teoría física y analítica sencilla de la holografía plana. Se introducen las nociones de la holografía de volumen, la acústica y la generada por computadora. Se muestra también un montaje práctico y algunas aplicaciones en los campos de la interferometría, de los dispositivos de memoria y en la fotografía, cine y televisión tridimensionales.

ABSTRACT

We present here a simple physical and analytical theory of plane holography. We introduce the notions of volumetric, acoustical and computer generated holography. We also show a practical arrangement and some of the applications in the field of interferometry, memory devices and 3-dimensional photography, movie and television.

1. INTRODUCCION

Es el proceso que permite tomar fotografías en tres dimensiones por medio de luz coherente (viene del griego escritura o vislón total).

Cualquier objeto puede ser observado a través del vidrio de una ventana que permita el paso de las ondas de luz que provienen del objeto. Ahora bien, si se encuentra una posibilidad de fijar estas ondas sobre el cristal de la ventana, "congelándolas" en él, por así decirlo, y si se pudiera "deshelar" estas ondas cuando se quisiera, liberándolas, el objeto ya no necesitaría estar allí para aparecer ante nuestros ojos,

porque las ondas fijadas en el cristal durante algún tiempo, llegarían a nuestros ojos como si de una observación directa se tratara.

El proceso de la holografía es inventar un procedimiento que permita "fijar las ondas del objeto" y esto se realiza si se toma un registro fotográfico de la figura de interferencia que forman dos haces luminosos coherentes, uno de los cuales se ha reflejado sobre el objeto.

Esto produce una especie de red de difracción, cuya teoría explicamos brevemente a continuación.

2. RED DE DIFRACCION

Se obtiene una red de difracción grabando un gran número de rayas paralelas equidistantes una distancia a sobre una lámina de vidrio. Se pueden usar para reflexión o transmisión.

Cuando un haz de luz paralela monocromática cae sobre una red de difracción, la luz que pasa por las rendijas es difractada en todas las direcciones y cada una de ellas es un foco secundario. Si en una dirección θ la diferencia de camino entre dos rayos consecutivos es igual a un número entero de λ , o sea

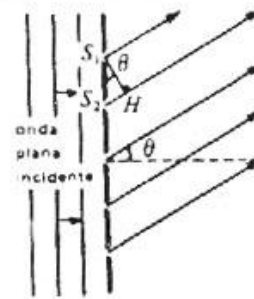


Fig 1

$$S_2H = a \sin \theta = m\lambda \quad (m=0,1,2)$$

tendremos interferencia constructiva para esta longitud de onda y también para todos los otros rayos paralelos a esta dirección porque todos están en fase. Fuera de estas direcciones, habrá interferencia destructiva porque cada rayo encontrará otro rayo, dentro de los miles que hay, en oposición de fase (fig.1).

Como el ángulo θ depende de λ , una luz compleja producirá un espectro para cada valor de m , llamado espectro de orden m ; para $m=0$, diremos que tenemos el espectro de orden 0, para $m=1$, diremos que tenemos el espectro de orden 1 (evidentemente existe el espectro simétrico que podemos llamar de orden -1).

3. TEORÍA FÍSICA DE LA HOLOGRAFIA

Iluminemos con luz coherente SP, S'P', ... una placa fotográfica y con la misma luz un objeto puntual O.

a) EL OBJETO O ESTÁ EN EL INFINITO (Fig. 2).

La luz que difunde O llega paralelamente como OP, O'P'... Los rayos directos SP, S'P'..., y OP, O'P'..., interfieren y tendremos franjas de interferencia.

En efecto, si SP y OP llegan en fase sobre la placa, tendremos una franja brillante en P y si $OP - O'P' = \lambda$, tendremos otra franja brillante en P' y así sucesivamente (figura 2) la distancia entre estas franjas brillantes es:

$$a = \frac{\lambda'}{\text{Sen } \theta'}$$

Así tendremos franjas igualmente espaciadas sobre la placa fotográfica que revelamos y fijamos: será una red de difracción, como vimos antes; llamaremos esta fotografía, **holograma**.

Si iluminamos inversamente este holograma con la misma luz coherente paralela, tendremos luz paralela que sale en el orden 0 que no tomaremos en cuenta y en el primer orden de cada lado de la normal a la placa o sea que esta luz va a constituir las imágenes de O en el infinito (Figura 3). (Se puede demostrar que una red de este tipo, llamada red sinusoidal, solamente produce espectros de orden +1 y -1).

b) EL OBJETO O ESTÁ CERCA DE LA PLACA (Figura 4).

Las franjas brillantes en P y P' están separadas

$$a = \frac{\lambda}{\text{Sen } \theta}$$

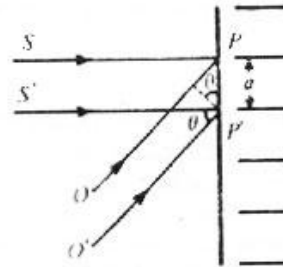


Fig. 2

Imagen de O en el infinito

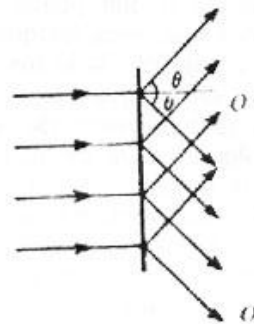


Imagen de O en el infinito

Fig. 3

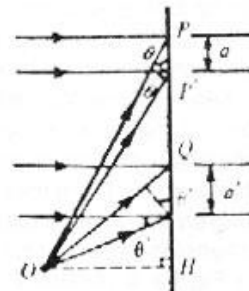


Fig. 4

mientras que en Q y Q' están separadas

$$a' = \frac{\lambda'}{\text{Sen } \theta'}$$

Como θ' es más pequeño que θ , a' es más grande que a , tendremos la red de difracción sobre la placa con franjas no igualmente espaciadas como muestra la Figura 4; estas franjas son arcos de circunferencia centrados sobre H. Si iluminamos inversamente este holograma con la misma luz coherente paralela, la luz del primer orden en P, P' emerge con el ángulo θ y en Q, Q' emerge con el ángulo θ'' de cada lado de la normal. De un lado tendremos que los rayos P0', P'0', Q0', Q'0' se reúnen en O' constituyendo una imagen real de O que puede ser captada sobre una placa fotográfica mientras que la del otro lado, los rayos P X, P' X', QX'', que son divergentes, parecen provenir de un punto O'', imagen virtual de O, cuando miramos desde X, X', X'' (Figura 5). Si este holograma es cortado en varios pedazos, cada uno de estos dará la misma imagen que el holograma total, por cierto, con menos luz.

OBJETO NO PUNTUAL

Si consideramos cualquier objeto como formado de una suma de puntos y lo iluminamos con luz coherente, tendremos sobre una placa fotográfica un holograma que es la resultante de todos los hologramas elementales anteriores. A la reconstitución, o sea iluminando ese holograma con luz coherente, cada holograma elemental reconstituye el punto del objeto en su posición original. Así tendremos dos imágenes en tres dimensiones, una real y otra virtual. La Figura 6 muestra la toma de un holograma y la Figura 7 la reconstitución de las imágenes.

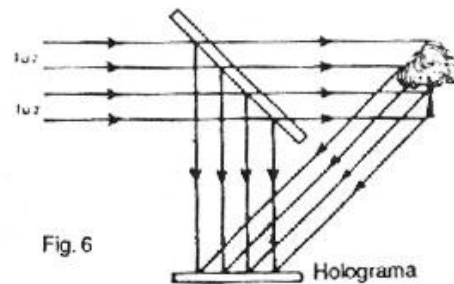
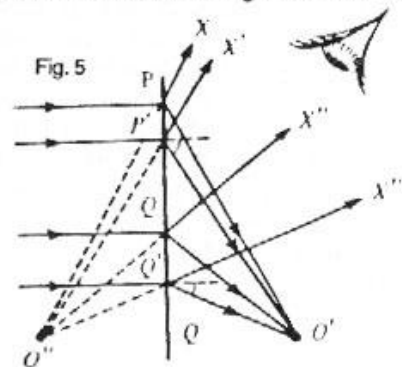


Fig. 6

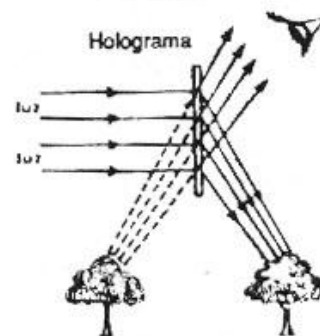


Fig. 7

4. TEORIA ANALITICA DE LA HOLOGRAFIA

a) TOMA DEL HOLOGRAMA

Dibujemos los ejes de coordenadas x y y en el plano de una placa fotográfica P (Figura 8). Sea una onda luminosa plana de frecuencia angular ω , de amplitud constante R que llamamos de referencia y que proviene de un láser que incide sobre P . La elongación de la onda de referencia sobre P es:

$$r(x,y) = R \cos(\omega t + \Phi(x,y))$$

La fase $\Phi(x,y)$ es una función que depende del punto A de la fotografía.

Por ejemplo, si la onda plana de referencia es inclinada un ángulo θ como muestra la Figura 8, la fase en cualquier punto de P dependerá solamente de y y será independiente de x : para A , la diferencia de camino es $s = y \sin \theta$, la diferencia de la fase será:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} y \sin \theta \quad (\text{con respecto a B})$$

La onda difractada por el objeto O puede expresarse como:

$$o(x,y) = O(x,y) \cos(\omega t + \phi(x,y))$$

donde tanto la amplitud como la fase son ahora funciones complejas que corresponden a un frente de onda irregular. Las dos elongaciones se superponen e interfieren sobre la placa fotográfica y ésta, registra en cada punto, la intensidad correspondiente, es decir el cuadrado de la elongación resultante, promedio en el tiempo, o sea:

$$I(x,y) = \langle (r + o)^2 \rangle$$

Efectuando los cálculos y simplificando la escritura, tenemos:

$$I(x,y) = \frac{R^2}{2} + \frac{O^2}{2} + RO \cos(\Phi - \phi)$$

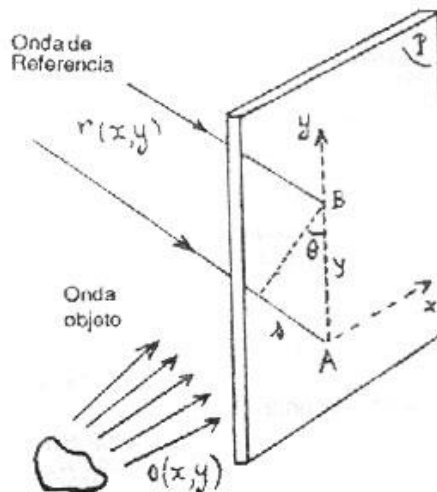


Fig. 8

b. RECONSTRUCCION DE LA IMAGEN

La placa anterior procesada fotográficamente de manera que las amplitudes transmitidas sean proporcionales a $I(x,y)$, es un holograma.

Iluminemos el holograma con la misma luz de referencia y con el mismo ángulo de incidencia o sea (Figura 9) $r(x,y) = R \cos(\omega t + \Phi)$ la onda transmitida es: $t(x,y) = I(x,y) r(x,y)$

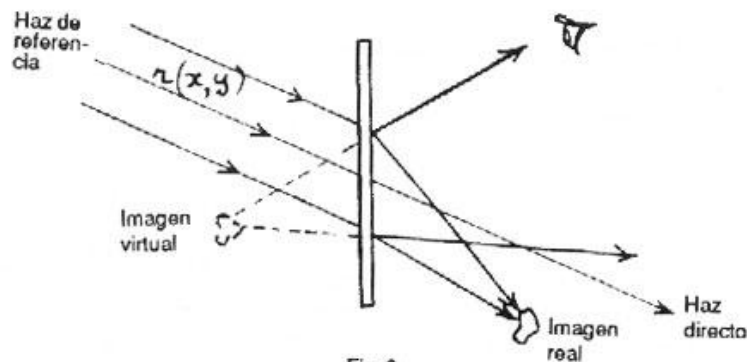


Fig. 9

o sea finalmente:

$$t(x,y) = \frac{1}{2} R(R^2 + 0^2) \cos(\omega t + \Phi) \\ + \frac{1}{2} R^2 0 \cos(\omega t + 2\Phi - \phi) \\ + \frac{1}{2} R^2 0 \cos(\omega t + \phi)$$

- El primer término de la onda transmitida es una onda modulada en amplitud de la onda de referencia. No contiene ninguna información acerca de la fase ϕ del objeto. Es el haz directo no deflectado de una red de difracción de orden cero.

- El segundo término representa una onda que tiene la amplitud de la onda que viene del objeto multiplicada por una constante. Además su fase contiene un factor 2Φ que proviene del ángulo de incidencia θ de la onda de referencia, por tanto este factor nos dará la separación angular entre las imágenes reales y virtuales. La fase de este término contiene otro factor $-\phi$ o sea la fase de la onda objeto pero negativamente. Esto indica que los rayos van a converger y formar por tanto una imagen real.

- El tercer término representa una onda que tiene la amplitud de la onda que viene del objeto multiplicada por una constante. Su fase contiene el factor $+\phi$ y esto indica que los rayos son divergentes y van a formar por tanto una imagen virtual.

Estos dos últimos términos representan los espectros $+1$ y -1 de una red de difracción.

5. HOLOGRAMA DE VOLUMEN

a. LA TOMA

Los hologramas vistos hasta ahora formaban una red de difracción bidimensional. Pero normalmente, la onda objeto y la onda de referencia de cierta longitud de onda forman un patrón tridimensional de ondas estacionarias (Figura 10) y si disponemos de una placa fotográfica gruesa, produciremos una red de difracción tridimensional que llamaremos holograma de volumen, procedimiento semejante al que utilizó Lippmann en 1891 para desarrollar sus fotografías en color.

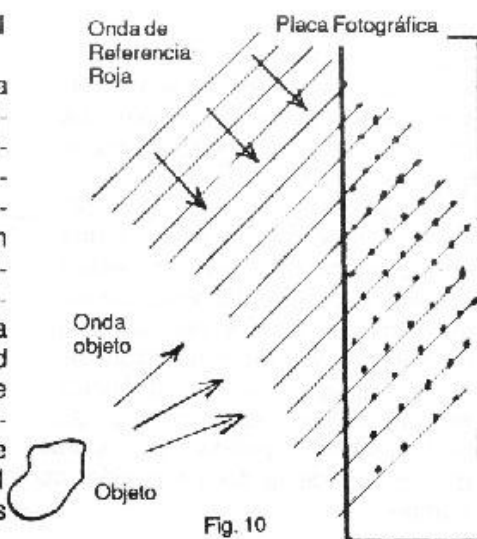


Fig. 10

La placa fotográfica puede ser reemplazada por una placa de vidrio fotocromático o por cristales de halógenos como BrK o por cristales ferroeléctricos como niobato de litio.

b. LA RECONSTRUCCION DE LA IMAGEN

Iluminando con luz blanca este holograma, este último se va a comportar en una forma muy parecida a un cristal irradiado con rayos X (Figura 11). Solamente una longitud de onda será reflejada en el ángulo dado por la ley de Bragg.

$$2d \sin \theta = k\lambda$$

(En nuestro caso, será el color rojo).

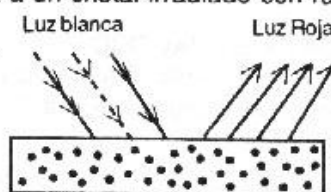


Fig. 11

La propiedad más interesante de los hologramas de volumen es de poder almacenar varios hologramas, coexistentes a la vez en el mismo soporte, modificando sucesivamente sea el ángulo de incidencia, sea la longitud de onda y de poder usar una fuente de luz blanca ordinaria para reconstruir imágenes tridimensionales.

6. HOLOGRAFIA ACUSTICA

En la holografía acústica, se utilizan dos fuentes ultrasónicas

idénticas: una produce la onda de referencia y la otra "ilumina" el objeto y por reflexión o transmisión produce la onda del objeto. La unión de las dos ondas forma el holograma acústico.

En la aplicación de la Figura 12 esta unión de las dos ondas forma un patrón de difracción en relieve sobre la superficie del agua. Se ilumina con un láser y por reflexión se obtiene una reconstrucción del objeto. Las ventajas de esta técnica residen en el hecho de que las ondas sonoras pueden propagarse dentro de los sólidos y líquidos densos donde la luz no puede, como por ejemplo dentro del cuerpo humano.

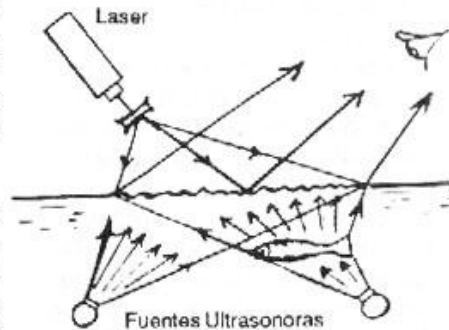


Fig. 12

7. HOLOGRAFIA GENERADA POR COMPUTADORA

Imaginemos un objeto iluminado por un láser y una onda de referencia. Por medio de un computador, se puede calcular punto por punto, la distribución de iluminación que aparecería sobre un plano cualquiera del espacio, y por medio de un graficador, dibujar las curvas de igual iluminación. Iluminando este holograma nos dará una imagen tridimensional de un objeto que nunca existió.

8. MONTAJE PRACTICO

El experimento más simple para la confección de hologramas puede hacerse según la figura 13.

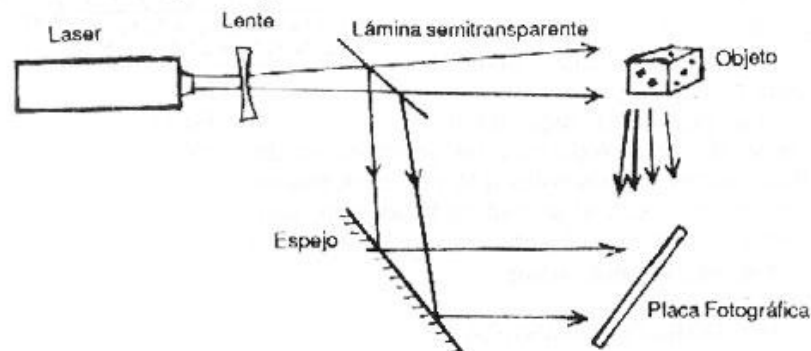


Fig. 13

Para evitar cualquier perturbación durante la toma de la foto, se debe realizar un montaje antivibracional como el de la Figura 14. Consiste en una caja de madera llena de arena, colocada sobre un neumático de motocicleta, medio inflado y los componentes ópticos en tubos de plástico parcialmente hundido en la arena. El neumático impide que las vibraciones del suelo sean transmitidas a la caja y la arena proporciona estabilidad a los aparatos sin transmitir tampoco vibración alguna.

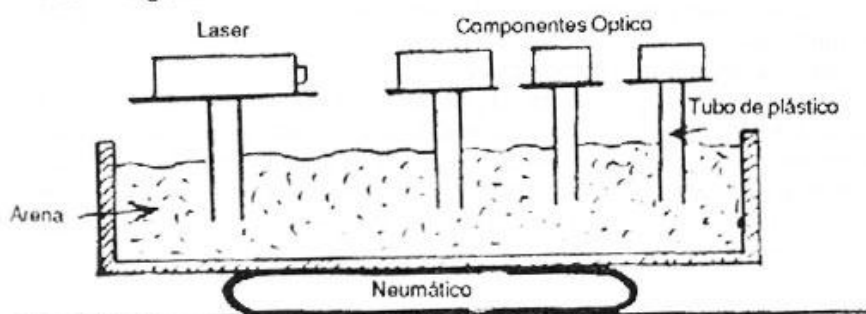


Fig. 14

Las precauciones que se deben tomar son:

- El haz de referencia debe tener sobre la placa fotográfica una amplitud mayor que la luz reflejada por el objeto, a fin que la intensidad transmitida por el holograma sea proporcional a la intensidad recibida. Esta condición está normalmente realizada.
- Se puede registrar una figura de interferencia, si en cada punto de la película, las ondas de luz del objeto mantienen una relación de fase fija con la onda de referencia. Para crear esta relación de fase, se necesita una luz coherente: la de un láser lo es. La luz que sale de un láser, podemos imaginárla como una sucesión de trenes de ondas. Cada tren está constituido por una onda cuya longitud (longitud de coherencia) es aproximadamente la misma que la del tubo de láser. Cuando los haces de referencia y objeto lleguen a la película, mantendrán, si forman parte del mismo tren, una relación de fase constante. Esta situación se consigue, haciendo que las distancias que recorran ambos haces, sean prácticamente iguales.
- La placa fotográfica es especial, debido a que la resolución que se requiere es netamente superior a la de una fotografía ordinaria. Dichas películas son especialmente sensibles a la luz roja, puesto que generalmente, se utiliza láseres de helio-neón cuya luz roja crearía un efecto despreciable en las películas ordinarias. Se pueden usar las emulsiones Kodak 649F, Agfa 8E75 por ejemplo.

- Para procesar la película, se utiliza un revelador ultra fino (Developer Kodak D-19 por ejemplo) El fijador puede ser hiposulfito común.

9. APLICACIONES

A. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA

Para estudiar deformaciones de algunas micras, se puede utilizar tres métodos:

Técnica de la Doble Exposición

Se hace un holograma del objeto sin perturbación y se expone el mismo holograma en las mismas condiciones y sin procesar, una segunda vez a la luz que viene del objeto ahora distorsionado. El resultante final son dos ondas reconstruidas superpuestas que van a formar una figura de interferencia indicativa de los desplazamientos sufridos por el objeto.

Método de Tiempo Real

El objeto se deja en la posición original todo el tiempo. Se hace un holograma del objeto sin perturbación y se procesa. Se coloca la imagen virtual que proviene de este holograma en la posición del objeto. Cualquier deformación que sufra el objeto, aparecerá, al mirar a través del holograma, como un sistema de franjas de interferencias debido a la superposición de los dos sistemas de ondas que provienen del objeto y de la imagen virtual.

Método de Tiempo Promedio

Se aplica a sistemas oscilatorios rápidos, de amplitud pequeña. Se expone la placa holográfica con una duración relativamente larga durante varias oscilaciones del objeto. El holograma resultante es una superposición de muchas imágenes que provienen de un patrón de ondas estacionarias, en las cuales, las regiones nodales se diferenciarán nítidamente de las otras regiones.

B. DISPOSITIVOS DE MEMORIA

Tomando un cristal, por ejemplo de niobato de litio, y cambiando sucesivamente el ángulo de incidencia, se pueden realizar una gran cantidad de hologramas. Esta propiedad hace tales sistemas muy atractivos como dispositivos de memoria. Un simple cristal puede almacenar miles de hologramas y cada uno de ellos puede ser "visto" si

se dirige sobre el cristal un haz láser con el ángulo apropiado. Se puede imaginar las aplicaciones: un libro, las estadísticas vitales de cada uno -fotografía, huellas digitales, buenos y malos hábitos, ingresos, historia de la vida-... una película de cine holográfica... grabados en un puñado de pequeños cristales transparentes.

C. FOTOGRAFIA TRIDIMENSIONAL EN COLORES

Los hologramas de volumen permiten la reproducción de imágenes a todo color. Se utiliza tres láseres de colores fundamentales -rojo, verde, azul-, cada uno de los haces de luz produce un holograma independiente que se superpone a los demás, sobre la misma placa fotográfica. Iluminando con luz blanca esta placa procesada, se producen tres imágenes coloreadas del objeto, lo que reproduce el color original del objeto.

D. CINE Y TELEVISION HOLOGRAFICOS

Del mismo modo que se puede representar un movimiento en el cine o en televisión, mediante una determinada sucesión de imágenes individuales por segundo, también se puede obtener la reproducción holográfica del movimiento emitiendo un determinado número de hologramas individuales.

Esto no es tan sencillo como puede aparecer en un principio. En cualquier caso, los tiempos de exposición tendrían que ser mucho menores que en fotografía. La estructura de red de difracción del holograma desaparece completamente, si durante la exposición, el objeto se mueve más de una longitud de onda o sea más de un milésimo de milímetro.

Para hacer posible el cine o la televisión holográficos, habrá que aumentar fuertemente la potencia del láser, lo que puede ser peligroso para la vista de los actores, y hacer mucho más sensible las placas fotográficas. Es por eso, que los hológrafos esperan con tanta ansiedad, los progresos de la química fotográfica.

REFERENCIAS

- An Introduction to Coherent Optics and Holography. G. Stroke. Academic Press.
- Physics Demonstration Experiments (Holograms). Edited. H. Meiners.
- Optica. Hecht-Zajac. Fondo Educativo Interamericano.
- El rayo láser. Hecht-Teresi. Biblioteca Científica Salvat.
- Láseres. E. Schwaiger. Editorial Brugera.
- Iniciación al láser. Ostapchenko. Marcombo Boixareu Editoriales.
- Los láseres. F. Hartmann. Collection Que sais-je?
- Los láseres. M. Ferratti. Collection scientifique contemporaine.