

---

# COMO ES UNA HOLOGRAFIA\*

MAIZTEGUI, A E IPARRAGUIRRE, L.

Facultad de Matemática, Astronomía y Física  
Universidad Nacional de Córdoba.

---

## DESVIAR LUZ ES "IMAGINAR"

Un espejo, una lente, forman imágenes ("imaginar") porque sus superficies (separaciones de dos medios ópticos distintos) tienen la propiedad de desviar las ondas luminosas: por eso asociaremos "desviar" con "imaginar".

## COMO "IMAGINA" UN ESPEJO

Todos hemos jugado con un espejito y el Sol, y dirigiéndolo hacia los ojos de otra persona, nos divertimos al deslumbrarla: ella, al mirar hacia el espejo, veía una imagen del Sol al recibir ondas que salieron del Sol, llegaron al espejo y éste desvió hacia sus ojos. (Fig. 1)

Si en lugar de enceguelarla con ondas directamente venidas del Sol, orientamos al espejo en otra dirección y le pedimos a esa persona que mire hacia el espejo, ella verá la imagen de algún cuerpo iluminado que emite ondas reflejadas, que con el espejo desviamos en dirección a sus ojos.

Lo que a ella permite ver la imagen, es precisamente, la desviación de las ondas en el espejo, que llegan hasta sus ojos como si provinieran de los puntos de la imagen: esa desviación es la reflexión de la luz.

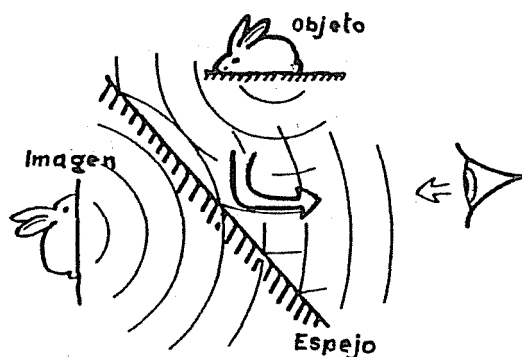


Figura 1: El espejo desvía la luz y produce la imagen que vemos.

## COMO "IMAGINA" LA SUPERFICIE DEL AGUA

Algunos indios, en lugar de pescar con anzuelos, cazan peces con flechas o lanzas. Pero saben muy bien, por experiencia, que no deben apuntar al pez que ven (pez - imagen) sino al pez - objeto. Seguramente no saben decir sus leyes pero conocen la refracción de la luz lo suficiente para apuntar en la dirección correcta. (Fig. 2)

## COMO "IMAGINA" UNA LUPA

Las ondas reflejadas que emite el alfiler iluminado se desvían dos veces en la lente: al entrar y al salir. El ojo recibe estas ondas desviadas y forma en su retina la imagen que le permite verlo. (Fig. 3)

---

\* Los autores elaboraron notas tomadas de una conferencia de Albert V. Bæz en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en Diciembre de 1987.

## OTRA FORMA DE DESVIAR ONDAS: LA DIFRACCION

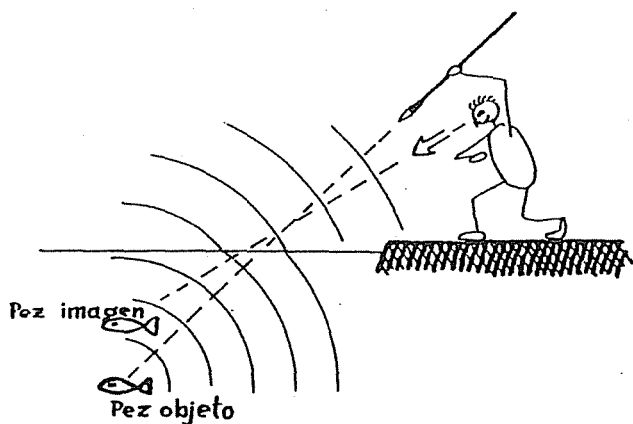


Figura 2: La superficie de separación agua-aire desvía los rayos de luz originados en el pez, y producen la imagen que el indio ve ... pero él sabe que ella es sólo un pez-imagen y apunta al "pez-objeto".

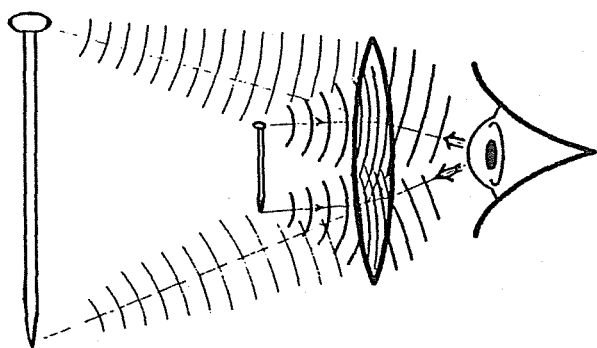


Figura 3: Las superficies de separación vidrio-aire desvían los rayos que partieron del objeto, y con sus nuevas direcciones el ojo los recibe como si vinieran de la imagen.

Hay un fenómeno ondulatorio muy curioso e interesante cuando uno lo advierte: la propiedad de todas las ondas (del mar, sonoras, de la radiotelefonía, de luz) de "rodear los obstáculos". Demos un sólo ejemplo de la vida diaria: en un espacio abierto, como un jardín, una pared no impide oír voces. Y si alguien oye una voz, es indudable que las ondas sonoras emitidas llegaron a su oído. ¿Cómo pudieron hacerlo, si las ondas sonoras "se propagan en línea recta"? Se propagan en línea recta ... mientras no encuentren obstáculos. Y cuando los encuentran, los rodean: ésta es la difracción de ondas. (Fig.4)

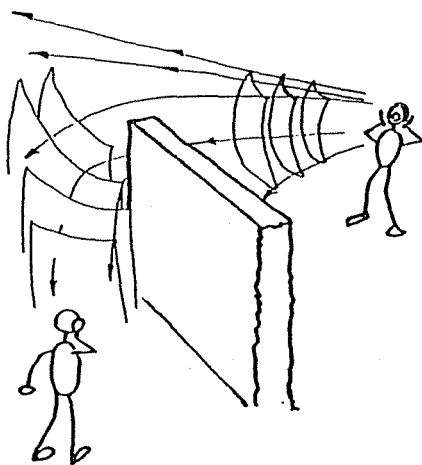


Figura 4: El borde de un obstáculo (como una pared) desvía los "rayos" sonoros que vienen de la fuente: difracción del sonido.

## DIFRACCION EN UN AGUJERO CIRCULAR

Hágase un pequeño agujero A circular en una hoja de papel, con la punta de un alfiler, y colóquesela delante de una lámpara de filamento, muy cerca de ella.

Hágase otro agujero B pequeñísimo en otra hoja, y a través de este agujero mírese al primero A, cuidando que a través de ambos pase luz directa de algún punto del filamento (Fig. 5).

Llama la atención que en lugar de verse el pequeño punto A, se ve un disco iluminado;

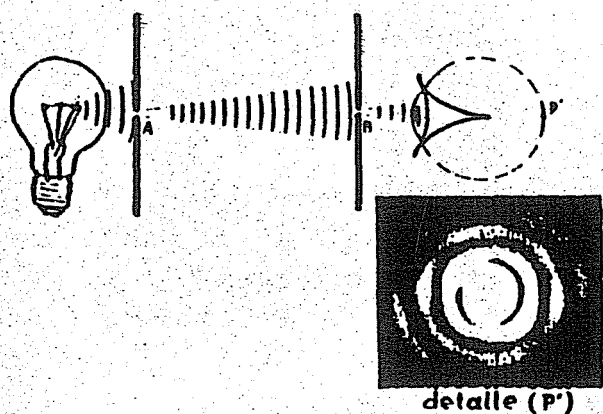


Figura 5: A través del agujero B observamos el punto luminoso A. Como B difracta la luz (la desvía), produce una imagen P' en la retina.

además, este disco está rodeado de anillos finos, brillantes y oscuros alternadamente. Lo que ocurre es que el agujero B difracta las ondas luminosas que le llegan de A. Al atravesar B, los puntos del agujero actúan como fuentes puntuales que emiten en todas direcciones (Principio de Huygens) e interfieren entre sí dando lugar a frentes de onda con intensidades diferentes en direcciones diferentes, con forma de conos con vértice en B.

Cuando estos frentes de onda entran al ojo, forman la imagen que permite ver A como un disco rodeado de anillos. (fig. 6)

### LAS ONDAS NOS INFORMAN SOBRE B

Si se repite el experimento con un agujero B' de diámetro mayor que el de B, se observará que el disco y los anillos de difracción han disminuído sus diámetros. Con un agujero de diámetro B'' menor que el de B se obtienen figuras de difracción de diámetros mayores que los que produce B. (Fig. 7)

Esto significa que los frentes de onda difractados en B llevan información sobre A; pero también sobre la forma y dimensiones de B.

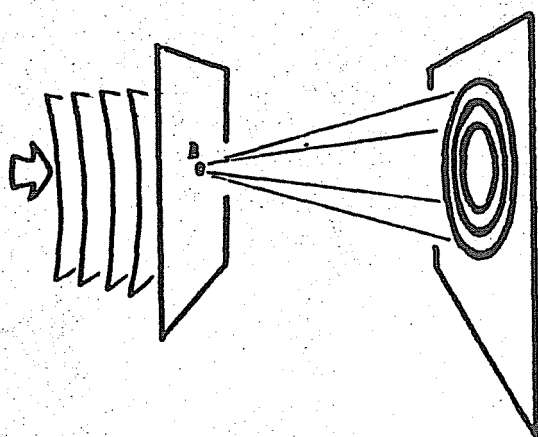


Figura 6: Esta imagen no está en la retina del ojo de un observador sino en una película fotográfica (que es como la "retina" de la cámara).

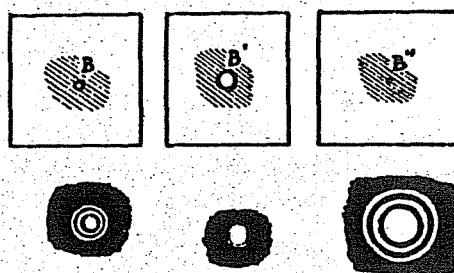


Figura 7: "Agujeros B" de distintos diámetros producen diferentes desviaciones de la luz, y por tanto, producen diferentes imágenes. Entonces, llevan información sobre A y también sobre B.

## DIFRACCION EN DOS AGUJEROS: EXPERIMENTO DE YOUNG

Preparemos un experimento como el anterior; pero en el segundo papel hagamos dos agujeritos (tan pequeños y cercanos entre sí como podamos). Cada agujerito "hace lo que la difracción le hace hacer", y emite sus conos de luz con ondas esféricas. (Fig. 8).

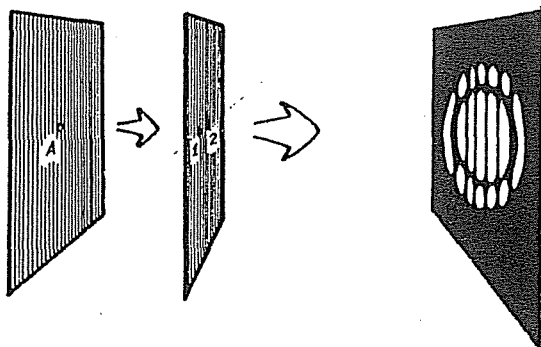


Figura 8: El agujero 1 difracta la luz, y también la difracta el agujero 2. Cada uno produce un conjunto de conos de luz que forman una imagen de A; pero las ondas que ocupan los dos conjuntos de conos interfieren entre sí y forman franjas luminosas y oscuras.

Pero los conos se superponen parcialmente, y las ondas luminosas interfieren entre sí. En la zona de los discos centrales se observa el resultado de la interferencia: finas líneas luminosas y oscuras, alternadamente, perpendiculares a la dirección definida por la recta que une los agujeritos.

Esta "figura de difracción" descrita es lo que ve un observador cuyo ojo, muy próximo al "doble orificio" (1, 2), MIRA EL PUNTO A, a través de (1, 2).

Al verla podemos decir: es una imagen del punto A, pero una imagen especial, pues hay en ella información acerca de la forma, tamaño y orientación relativa de los agujeritos ya que el ancho de las franjas, su separación y orientación, depende de aquéllos.

Supongamos que, de aquí en más, dejamos de interesarnos por A, y comenzamos a interesarnos por el doble orificio (1, 2).

La información sobre éste (1, 2) está en el frente de ondas responsable de la figura 9.

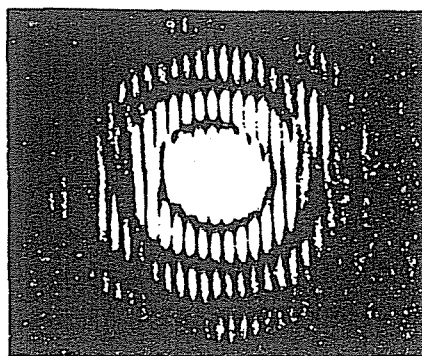


Figura 9: Esta es una fotografía obtenida con una película fotográfica colocada en el plano de la derecha dibujado en la Fig. 8.

No es una información directamente utilizable, sino más bien, diríamos que está "codificada".

¿Será posible utilizar esta información? Sí, y de una manera asombrosamente simple y natural: si el ojo se aleja de los orificios (1, 2) ahora los verá. Pero el frente de ondas que le permite verlos, que los dibuja en su retina, no ha cambiado, es el mismo que, más cerca, había "dibujado" los anillos con las franjas de la figura 9.

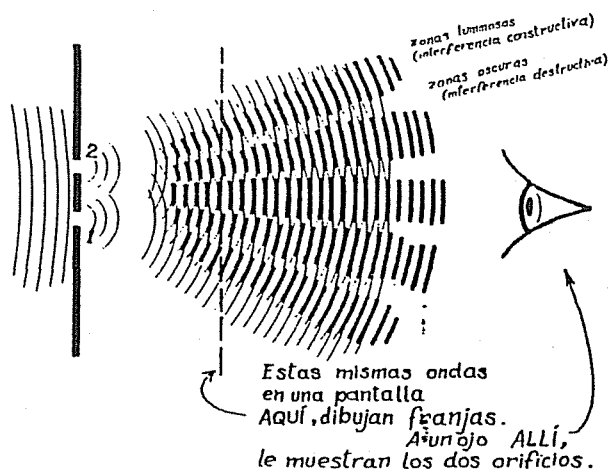


Figura 10: Si el ojo está ubicado muy cerca de los orificios 1 y 2, (en el plano punteado) las ondas le permiten ver el agujero A; si se aleja, esas mismas ondas le permiten ver los agujeros 1 y 2.

Seguiremos explorando la posibilidad de utilizar esa información contenida en la figura 9, impulsados por el deseo de idear algún mecanismo capaz de construir (ó reconstruir) de manera "artificial" el frente de ondas; lo que equivaldrá a "IMAGINAR" de manera artificial los orificios (o al menos alguno de ellos), para luego seguir con objetos más complejos.

### UN PRIMER HOLOGRAMA

En lugar de la pantalla utilizada antes para ver las figuras de difracción (línea de trazos en la fig. 10), coloquemos una película fotográfica positiva (diapositiva).

La luz la impresionará, dibujando en ella la pequeña figura de franjas y anillos; como es positivo el filme se volverá transparente en las zonas iluminadas, y permanecerá opaco en las zonas oscuras. La información transportada por los frentes de onda habrá quedado registrada en la película: ésta será ahora un HOLOGRAMA. Nuestra inquietud en este punto es: ¿Cómo utilizar la información guardada en el holograma?

Notemos primero que si colocamos la película ya revelada en el lugar exacto en que fue impresionada, no producirá ningún efecto ya que sólo es opaca en los lugares a los que no llega luz, y transparente donde los frentes de onda llegan, o sea que en principio, no los frena ni desvía, ni modifica en manera sensible.

Recordemos siempre que estamos interesados en 1 y en 2, pero no en A, que es quien los ilumina, y al que ya hemos olvidado.

Si se suprime el orificio 2, dejando sólo el 1 (ó para el caso colocamos cualquier fuente puntual en 1), ahora las zonas opacas de la película "atajarán" parte del frente de ondas y dejarán pasar sólo las "zonas luminosas" que correspondían a los dos orificios (1, 2): habrán RECONSTRUIDO el frente de ondas correspondientes a dos orificios.

El ojo no distingue entre los frentes de ondas que le llegan cuando están formadas por 1 y 2, y los formados por 1 y el holograma: la fuente 2 NO ESTA, pero el ojo la VE en la dirección  $\theta \cong \lambda/d$  de donde le llega el primer máximo de interferencia formado por la fuente 1 y la red - holograma.

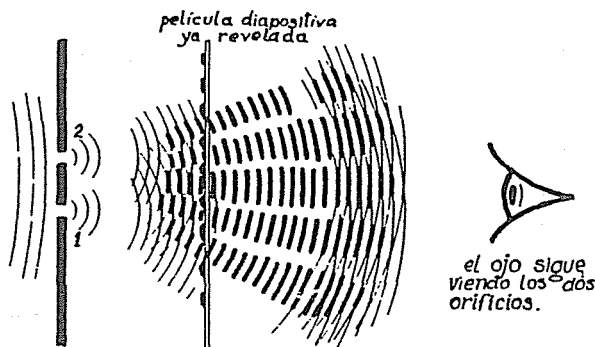


Figura 11: Cerca de la pantalla con los agujeros 1 y 2 (donde está el plano punteado de la fig. 10) colocamos una película fotográfica virgen. Al iluminar los agujeros A, 1 y 2, en la película quedan registradas las franjas de interferencia de la Fig. 9.

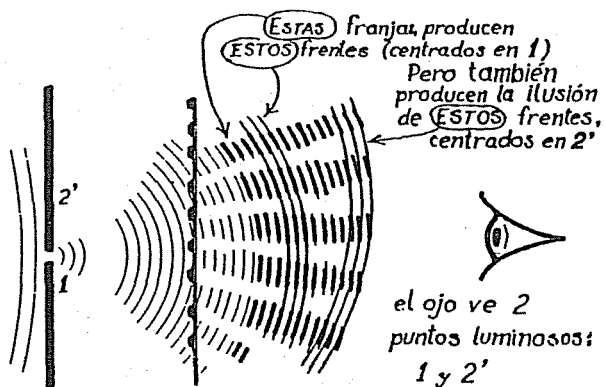


Figura 12: Si tapamos el orificio 2 (señalamos su lugar con 2'), al iluminar con el agujero A como fuente, la película con franjas, sólo pasa la luz que pasaba con los agujeros 1 y 2: el ojo recibe las mismas ondas ya sea con 1 y 2 (sin película) o con 1 (con película). Luego, el ojo "ve" los agujeros luminosos 1 y 2 (aunque 2 no esté).

**ILUMINACION CON LASER**

En los experimentos con "luz natural" como la de una lámpara de filamento, las figuras de interferencia observables con facilidad están cercanas a la dirección del haz central porque para ángulos mayores los diferentes haces difractados dejan de ser coherentes, y se van apagando las franjas de interferencia porque dejan de ser estables.

La luz laser deja a un lado esta limitación por su gran coherencia: las franjas se observan a ángulos grandes y los frentes de onda impresionan con ellas no sólo la parte central del holograma sino toda su superficie. Entonces ya no es necesario que las fuentes de ondas 1 y 2 estén muy cercanas: pueden estar alejadas una de la otra, como en la figuras 13 14 y 15, y los haces 1 y 2 conservarán su coherencia e interferirán.

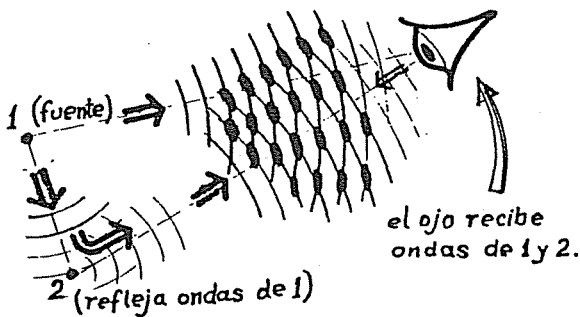


Figura 13: La fuente 1 emite ondas y el objeto 2 refleja ondas; ambos conjuntos interfieren y las ondas resultantes llegan al ojo.

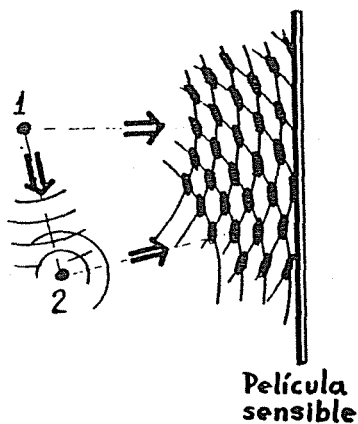


Figura 14: Una película sensible está colocada en el espacio donde interfieren las ondas provenientes de 1 y de 2, y quedan grabados en ella los máximos y mínimos.

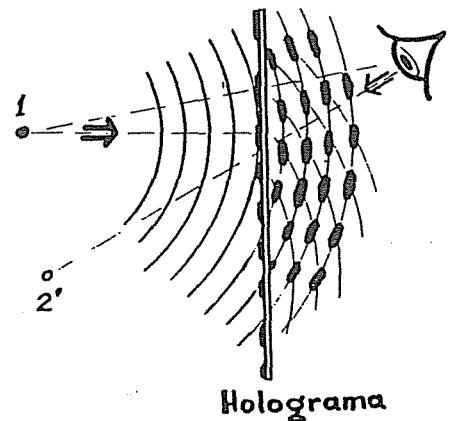


Figura 15: Si se ilumina el objeto (señalamos con 2' el lugar donde se encontraba) y la fuente 1 ilumina la película sensible ya revelada (holograma), las ondas que pasan a través suyo y llegan al ojo tienen la misma configuración que cuando estaban 1 y 2: el ojo "ve la imagen de 2".

La luz laser de la fuente 1 ilumina la película fotográfica y el cuerpo puntual 2. La luz emitida por 2 (reflejada en 2) y que ilumina la película es coherente con la que llega de 1 (propiedad del laser) y entonces interfieren entre sí y forman la red de franjas de difracción (holograma) que se graba en la película.

Si colocamos el holograma, quitamos el cuerpo puntual 2 y observamos a través del holograma, nuestro ojo no distinguirá los frentes de onda suma de las fuentes 1 y 2, de los frentes de onda suma de la fuente 1 y la red de difracción-holograma ... y ve el cuerpo 2 aunque no esté.

**EL LASER ILUMINANDO UN CUERPO, NO SOLO UN PUNTO**

Reemplacemos el objeto puntual 2 por un cuerpo (mucho puntos, 2, 3, 4, ...). Cada par de ondas (1, 2), (1, 3), (1, 4), ... forma su red de difracción. También forman las suyas los pares (2, 3), (2, 4), ... , (3, 4), (3, 5), ... La suma de todos los frentes forma el frente de ondas que ilumina la película y queda registrado en ella como una compleja y múltiple red de difracción.

Cuando se ilumina el holograma con la fuente original (u otra análoga), a éste sólo llegan frentes de onda provenientes de la fuente 1; al atravesar las complejas redes de difracción

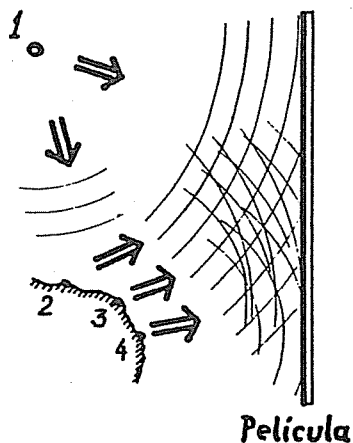


Figura 16: La luz laser ilumina la película y el cuerpo con puntos 2, 3, 4, ...etc. La película recibe los frentes de onda suma de todas las ondas, y los graba.

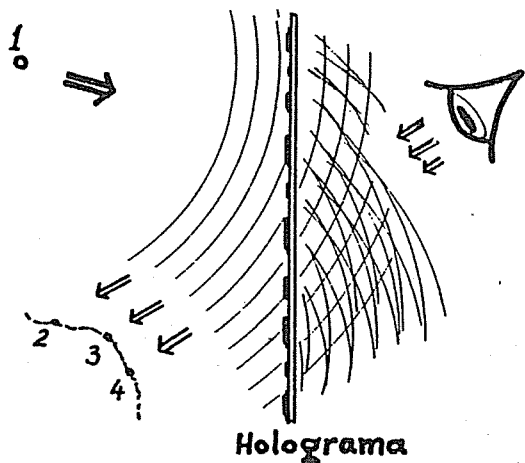


Figura 17: Los frentes de ondas resultantes de las ondas emitidas por 1 más las emitidas por reflexión en 2, 3, 4, ... no son distinguidos por el ojo de los frentes de ondas emitidos por 1 que atraviesan el holograma: el ojo ve la imagen holográfica del cuerpo con sus puntos imágenes 2', 3', 4', ...

del holograma surge un frente de ondas igual al que se grabó en la película. Entrando al ojo, ese frente de ondas forma en la retina una imagen igual a la que inicialmente le permitía ver el cuerpo (2, 3, 4, ...).

### EPILOGO

¿Cómo vemos un objeto? Ver un objeto es una clara señal de que ondas luminosas que partieron de él, han entrado por la pupila al ojo y forman su imagen en la retina.

El objeto que miramos puede ser una fuente de luz propia (una estrella) o de luz reflejada (la Luna, o una flor iluminada por el Sol o por una lámpara). El proceso de la visión es el mismo: las ondas que partieron de cada punto del objeto forman frentes de onda que llegando al ojo directamente, sin desviaciones previas, determinan la visión del objeto.

¿Cómo vemos la imagen de un objeto? Si los frentes de ondas formados por las ondas emitidas por cada uno de los puntos del objeto fuente de luz (propia o reflejada) son desviados de alguna manera (reflexión, o refracción, o difracción), los frentes llegan modificados al ojo y ellos son (con sus modificaciones) los que permiten ver la imagen del objeto (simétrica, real o virtual, agrandada, igual o disminuída).

Si tenemos una fotografía de la imagen, es ésta (la imagen) la que queda grabada en la película fotográfica.

El holograma es diferente de la fotografía de la imagen: en la película quedan grabadas redes de difracción. Si se las ilumina con ondas de la fuente original o una análoga (luz laser por la necesidad de coherencia), los frentes de ondas difractados son una reconstrucción de los frentes de ondas originados por la fuente laser original y luz laser reflejada en el objeto iluminado. Estos frentes, al entrar al ojo, forman en su retina una imagen igual a la que formaban los frentes de onda con la luz recibida del laser y la luz recibida del objeto iluminado; con una diferencia: en este caso (observando a través del holograma) el objeto no está, pero el ojo ve su imagen holográfica.

En la formación de una imagen por reflexión o por refracción y en una fotografía común, hay una correspondencia entre cada punto objeto y su punto imagen. En cambio, en una holografía cada punto del objeto envía ondas que cubren todo el holograma. Dicho de otra manera: desde cada región del holograma se ven

todos los puntos del objeto con una perspectiva propia de esa región del holograma. Por eso, si uno mueve la cabeza de modo que en el ojo vayan entrando sucesivamente frentes de ondas provenientes de diferentes regiones del holograma, se ven imágenes del objeto desde diferentes perspectivas: "la" imagen es tridimensional.