

Medida del diámetro de un haz gaussiano*

L.E. REGALADO

*Centro de Investigación en Física, Universidad de Sonora
Apartado postal 5-088, Hermosillo Sonora, México*

V. BREDART

Ecole Sup. d'Optique, Orsay, Francia

Y

J. SANDOVAL CHÁVEZ

*Departamento de Física, Universidad de Sonora
Hermosillo, Sonora, México*

Recibido el 3 de enero de 1995; versión corregida el 27 de abril de 1995
aceptado el 28 de agosto de 1995

RESUMEN. Se describe un montaje experimental que permite medir el diámetro de un haz gaussiano de anchura L , centrado sobre una rendija rectangular de anchura l . Se identifican expresiones simples del coeficiente de transmisión a través de la rendija τ y de la intensidad del haz difractado, que conducen a la determinación del diámetro del haz gaussiano proveniente de un láser de He-Ne en el caso $0.001 \leq \frac{\lambda}{l} \leq 0.1$ y $\frac{L}{l} \geq 1.5$.

ABSTRACT. We describe an experimental setup to measure the diameter of gaussian beam with a bandwidth L , centered onto slit of width l . The method proposed by Mata-Méndez demands the measurement of two experimental values: the transmission coefficient τ and the diffracted intensity $I(\theta)$ from which we may able to determine the diameter of the incoming gaussian beam. In the case of a He-Ne laser, the numerical conditions are $0.001 \leq \frac{\lambda}{l} \leq 0.1$ and $\frac{L}{l} \geq 1.5$.

PACS: 42.60.Jf

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe un montaje experimental que permite medir el diámetro de un haz gaussiano de acuerdo al método propuesto por Mata-Méndez [1]. Los resultados obtenidos con un montaje no muy complejo, permiten hacer un ejercicio de laboratorio de óptica o de física moderna para estudiantes de licenciatura o de posgrado.

El problema teórico es unidimensional, ya que se realiza una difracción a través de una rendija. Un haz gaussiano de ancho L , centrado sobre la rendija de ancho l , tendrá una distribución de intensidad en función de la posición x cuando está centrado en la rendija ($b = 0$)

$$I(x) = I_p \exp \left[\frac{-4x^2}{L^2} \right]. \quad (1)$$

* Trabajo parcialmente apoyado por CONACYT-1578.

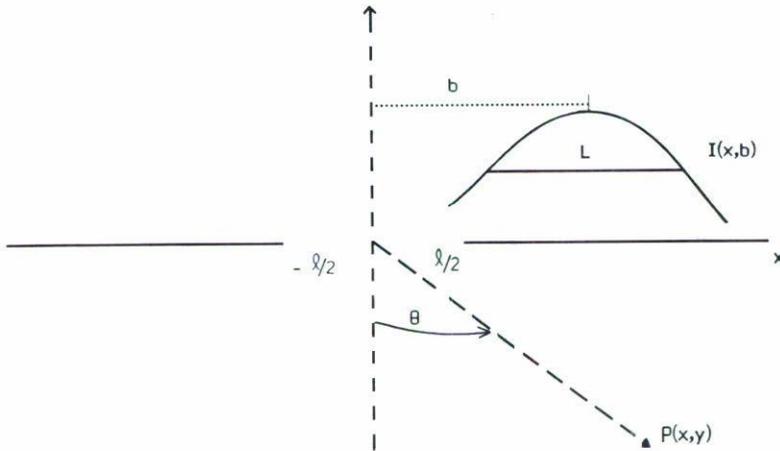


FIGURA 1. Una rendija de anchura l , perpendicular al plano de la figura es iluminada por un haz gaussiano de diámetro $L > 1.5l$. Cuando los centros de l y L coinciden, el parámetro b es igual a cero ($b = 0$), lo que aporta las condiciones de simplificación del método para detectar el ancho del haz gaussiano.

El patrón de difracción observado después del paso del haz por la rendija tendrá la forma de una función $\text{sinc}^2(x)$, cuadrado de la transformada de Fourier de la rendija de perfil rectangular.

Son de interés para el tratamiento los parámetros mostrados en la Fig. 1. Llamamos τ al coeficiente de transmisión a través de la rendija y \mathcal{E} a la intensidad difractada en la dirección del haz gaussiano. Tanto \mathcal{E} como τ están normalizados con respecto a la intensidad total del haz incidente I_0 .

Los cálculos de Mata-Méndez muestran que para el haz gaussiano centrado en la rendija, cuando se estudia la región escalar ($0.001 < \frac{\lambda}{l} < 0.1$) con un haz incidente de longitud de onda λ se obtienen expresiones muy simples para esos parámetros:

$$\tau = \frac{1}{0.89 L + 0.106} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{\lambda(0.89 L + 0.106)}$$

El propósito es medir el diámetro del haz gaussiano L , por lo que se medirá experimentalmente la potencia $P_{\text{max}} = 1/(0.89 q + 0.106)$ propuesta en la misma referencia, verificando que el haz esté centrado. El cociente $q = L/l$ debe satisfacer la condición $q \geq 1.5$ impuesta por las condiciones para que el patrón de difracción sea observado. La variación de la anchura de la rendija y diferentes aberturas del haz gaussiano nos darán información apropiada sobre la validez del método.

Para deducir la anchura del haz gaussiano, se grafica la potencia máxima recibida en cada caso contra el factor q , obtenido teóricamente por Mata-Méndez y se despeja para L ; el tratamiento es bastante sencillo.

Medida del diámetro de un haz gaussiano

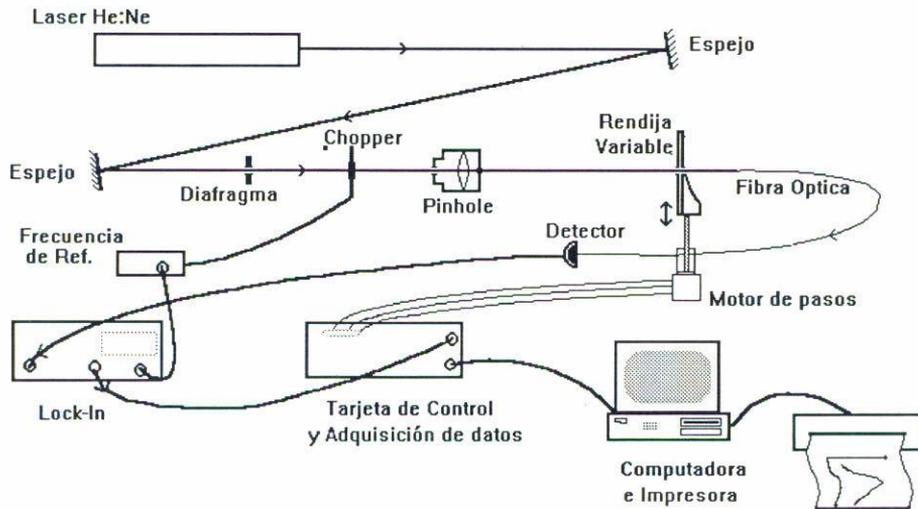


FIGURA 2. Esquema del montaje utilizado para la determinación del diámetro de un haz gaussiano.

2. DATOS NUMÉRICOS

El método estudiado se aplica sobre todo a haces luminosos de baja frecuencia como el infrarrojo o aun las microondas, pero para una prueba del montaje se utilizará un haz visible, emitido por un láser He-Ne, de $\lambda = 632.8$ nm, por lo que los intervalos de validez mencionados arriba imponen el uso de una rendija que varíe entre 7 mm y 6.3 mm, con un haz gaussiano de alrededor de 1 mm de diámetro.

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

El láser He-Ne emite ya un haz gaussiano pero no es estabilizado, es alineado por medio de dos espejos. Con un *pin-hole* se realiza a la vez la limpieza de haz para que sea verdaderamente gaussiano y la variación de su anchura. Una rendija de anchura regulable montada sobre un soporte de movimiento axial permite centrar la rendija con el haz gaussiano (Fig. 2).

Para la medida de la intensidad del haz difractado, se utiliza una fibra óptica montada en un soporte con movimiento X-Y, cuya posición puede ser controlada con precisión en la dirección vertical para centrar la señal en su máximo, mientras que el desplazamiento horizontal se realiza por medio de un tornillo micrométrico conectado a un motor de pasos que a su vez es controlado por una microcomputadora PC que tiene un par de tarjetas de control suministradas por Elíptica de Ensenada, B.C. (EXISA e INAD) junto con programas para adquisición de datos. Así es posible medir la distribución transversal de la intensidad del haz difractado (plano horizontal cuando la rendija es vertical).

La fibra óptica, cuyo extremo es móvil, permite llevar la luz hasta un detector (fotodiodo PIN de Si) cuya señal es amplificada y detectada por la microcomputadora por medio de

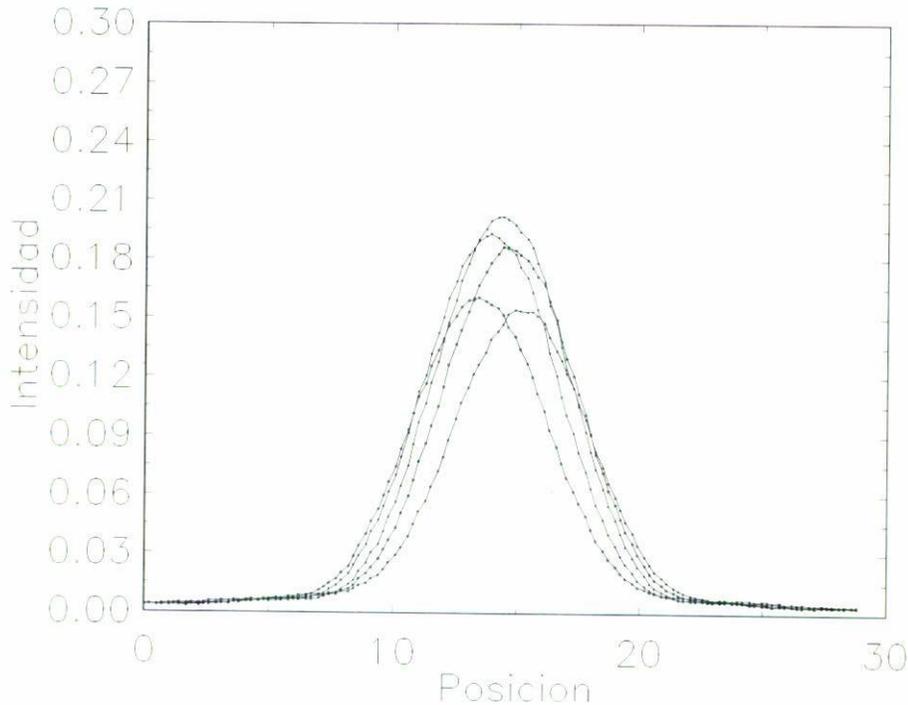


FIGURA 3. Medición del haz difractado por una rendija, desplazándola perpendicularmente al haz incidente. Se logra así el centrado de la rendija para $b = 0$. En la figura se muestra la detección del haz transmitido por la rendija para diferentes valores de b y el máximo corresponde al haz centrado.

la misma tarjeta EXISA, de control y adquisición de datos, los cuales son tratados con un programa en Pascal hecho expresamente para el experimento aquí tratado.

4. ALINEACIÓN, ADQUISICIÓN DE DATOS

Para alinear el haz proveniente del laser, se utiliza un banco óptico donde se encuentran un agujero circular que se desplaza para que el haz lo atraviese por su centro en cualquier posición. Un *pin-hole* o abertura circular muy pequeña en el foco de un objetivo permite limpiar el haz al dejar pasar sólo el modo TEM_{00} de forma gaussiana y colimar el haz con un diámetro reducido, adecuado a las dimensiones apuntadas anteriormente. Al final se debe colocar la rendija entre el extremo móvil de la fibra óptica y el *pin-hole*.

5. RUIDO, DETECCIÓN SÍNCRONA

El haz incidente estudiado fue muy fino, por lo que la medida de la intensidad del haz difractado es muy sensible al ruido. A pesar de las precauciones tomadas, como cubrir el haz con papel negro y evitar la iluminación ambiental, nuestras primeras muestras fueron manchadas por un ruido de más o menos 5%, por lo cual decidimos utilizar la detección

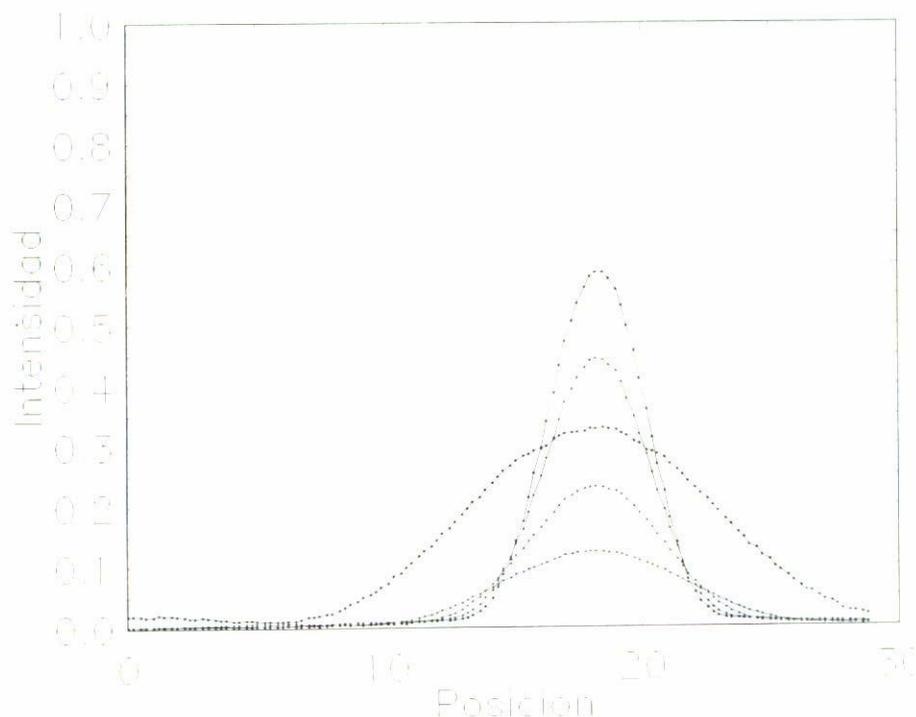


FIGURA 4. Medición del haz difractado por diferentes anchuras de la rendija, el pico de mayor intensidad corresponde a la mayor abertura. El haz gaussiano fue colimado con un objetivo de $15\times$, resultando un diámetro L_1 .

síncrona. Entonces cortamos la señal con un “chopper” o cortador de luz: disco rotatorio que modula la luz incidente con una frecuencia regulable y permite discriminar la señal de origen de la luz ambiental. La medida se hizo colocando entre el fotodiodo y la tarjeta EXISA un amplificador con amarre de fase y de frecuencia (*lock-in*) seleccionando cuándo amplificar la señal a la frecuencia del “chopper”.

Este sistema protege las medidas del ruido a 60 Hz introducido por la rejilla eléctrica; escogimos una frecuencia del chopper que no fuera múltiplo de 60 Hz (alrededor de 1000 Hz). Pudimos entonces conservar un poco de luz ambiental durante nuestras medidas, sin introducir ruido en la señal detectada.

6. MEDICIONES Y PROCEDIMIENTO

1) Primero, se realiza una calibración del movimiento, para determinar el movimiento transversal de la extremidad móvil de la fibra óptica. Este movimiento se produce por medio de las tarjetas EXISA e INAD con una precisión de 8 pulsos por grado, equivalentes a un desplazamiento de 0.19 mm/vuelta, haciendo un barrido total de $5.7 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$.

El movimiento del detector debe hacerse siempre en el mismo sentido para que la calibración sea válida. Utilizamos un movimiento desde -15 grados por pasos de -0.25

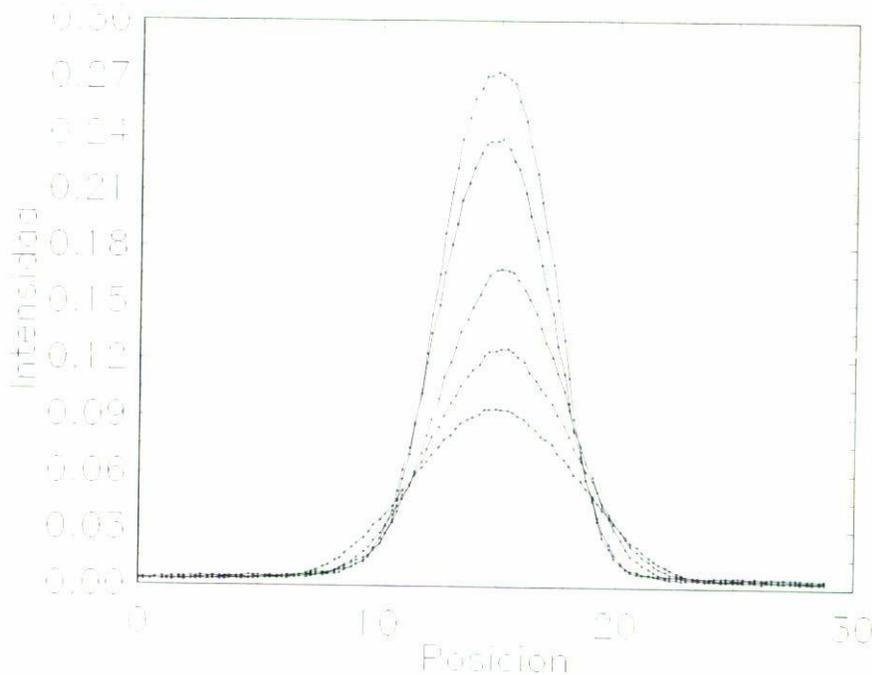


FIGURA 5. Medición del haz difractado por diferentes anchuras de la rendija. El haz gaussiano fue colimado con un objetivo de $10\times$, resultando un diámetro L_2 .

grados, cada paso siendo separado por una pausa de 300 ms (tiempo necesario para leer la posición del tornillo micrométrico del soporte del detector).

2) Se realizan las mediciones de distribución transversal de la intensidad del haz.

La toma de mediciones debe ser tan rápida como sea posible para no ser sensible a la deriva del láser, que no es estabilizado. Con esta misma intención, encendemos el sistema con una hora de anticipación a las mediciones para que el láser se estabilice. Debemos asegurarnos que el extremo fijo de la fibra óptica se mantenga perfectamente inmóvil con respecto al fotodiodo durante el tiempo de las mediciones.

Para verificar la estabilidad de las mediciones y su repetibilidad se rehicieron todas las mediciones al menos dos veces en las mismas condiciones.

3) En la primera serie de mediciones se debe centrar la rendija sobre el haz (para cumplir con la importante condición, $b = 0$). Para ello, se realiza un movimiento transversal que puede ser comandado por la computadora, pero no fue necesario, ya que se pudo hacer manualmente, sin perder precisión, ya que sólo se varía esta posición muy pocas veces.

Colocamos el detector lo mejor que pudimos en el centro del haz y leyendo los picos de transmisión del detector en diferentes posiciones de la rendija, pudimos localizar el máximo, que corresponde a la coincidencia del centro del haz y el centro de la rendija (Fig. 3).

4) Cuando la rendija estuvo centrada, se procedió al registro de la distribución de la intensidad del haz difractado, para diferentes anchuras de la rendija (Fig. 4).

5) Se repitieron los pasos 3) y 4) para otro valor del ancho del haz gaussiano modificado por el cambio del objetivo en el *pin-hole* (Fig. 5).

TABLA I. Valores de la anchura de la rendija utilizada en la difracción del haz gaussiano.

Rendija 1	0.016 mm
Rendija 2	0.019 mm
Rendija 3	0.023 mm
Rendija 4	0.033 mm
Rendija 5	0.052 mm

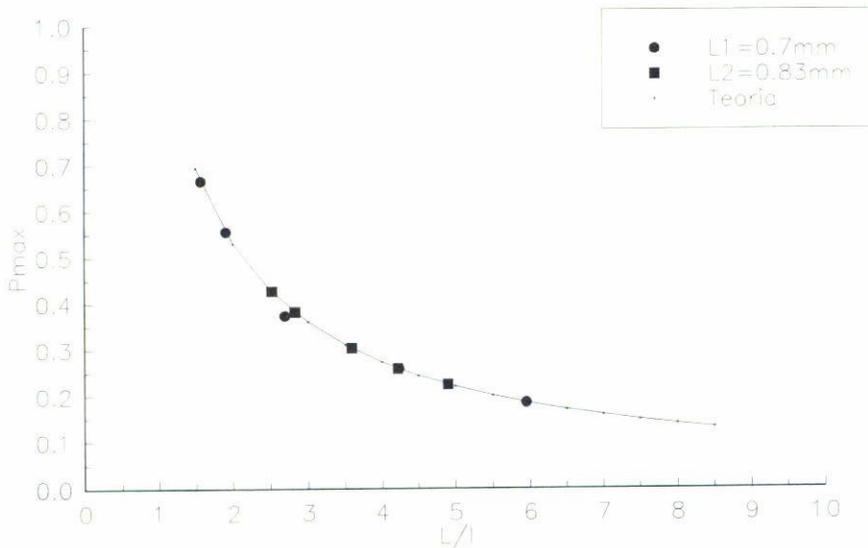


FIGURA 6. Posición de la potencia máxima normalizada con respecto a la intensidad máxima del haz sin rendija, en función de $q = L/l$, en la región escalar, de donde se deriva un valor promedio del ancho del haz gaussiano L_1 y L_2 correspondientes a los dos casos presentados en las Figs. 5 y 6.

7. RESULTADOS

Una vez lograda la condición de centrado de la rendija ($b = 0$) se mide la distribución de intensidad del haz difractado por las diferentes anchuras de la rendija, cuyos valores medidos en el microscopio se muestran en la Tabla I.

Las incertidumbres fueron de 0.0005 mm.

De las curvas mostradas en las Figs. 4 y 5 se obtiene la potencia máxima, integrando el área bajo la curva por medio del programa de gráficas llamado ORIGIN, las cuales se normalizan con respecto a la intensidad máxima del haz directo (sin rendija).

El propósito de este trabajo es la verificación de una de las leyes que marcan la evolución de τ y de \mathcal{E} en función de q , la razón entre el diámetro de un haz gaussiano L sobre la anchura de la rendija l , y de ahí determinar el valor de L .

La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos a partir de las curvas experimentales de la distribución transversal del haz difractado. Se puede calcular el diámetro del haz para

cada anchura de la rendija que hemos utilizado con la fórmula $L = l(1/P_{\max} - 0.106)/0.89$.

Los resultados obtenidos para dos valores diferentes del diámetro del haz fueron

$$L_1 = (0.70 \pm 0.05) \text{ mm} \quad \text{y} \quad L_2 = (0.83 \pm 0.05) \text{ mm}.$$

Las incertidumbres provienen de los valores medidos del ancho de la rendija l , lo cual se hizo con un microscopio ayudados de un ocular micrométrico, que nos mostró irregularidades en los bordes de la rendija.

8. CONCLUSIONES

Con este trabajo se muestra que el método propuesto por Mata-Méndez para medir el diámetro de un haz gaussiano es viable, al menos en la región escalar, donde tanto el ancho de la rendija como el haz son mucho mayores que la longitud de onda de la luz emitida por la fuente.

Aunque en nuestros resultados se presentan fuertes incertidumbres, éstas no son debidas al método, sino a las irregularidades mecánicas encontradas en la rejilla de anchura variable y en menor medida a la deriva de la señal aportada por el láser.

La extensión de este trabajo hacia la región de resonancia ($5\lambda > l > 0.4\lambda$), donde aparecen efectos de polarización de acuerdo con el trabajo original de Mata-Méndez será objeto de un estudio posterior.

REFERENCIAS

1. O. Mata-Méndez, *Optics Lett.* **16** (1991) 1629.