



Light sources characterization and coherence properties.III/*Caracterización de fuentes de luz y propiedades de coherencia.III*

Prof. María L. Calvo

2nd May/2 de mayo 2012: 15:00-16:00

First ICO-ICTP-TWAS Central American Workshop in Lasers, Laser Applications and Laser Safety Regulations, San José de Costa Rica

Objetivos

- Comprender y aplicar el concepto de coherencia óptica asociado a la radiación electromagnética.
- Comprender el funcionamiento de interferómetros básicos por división de amplitud y por división del frente de ondas.
- Revisar algunos experimentos fundamentales desarrollados en el s. XX para comprender el concepto de coherencia espacio-temporal de la luz.

Coherencia espacial de fuentes de luz

- **Definición de coherencia espacial**

Propiedad de una fuente de luz ligada a las dimensiones finitas.

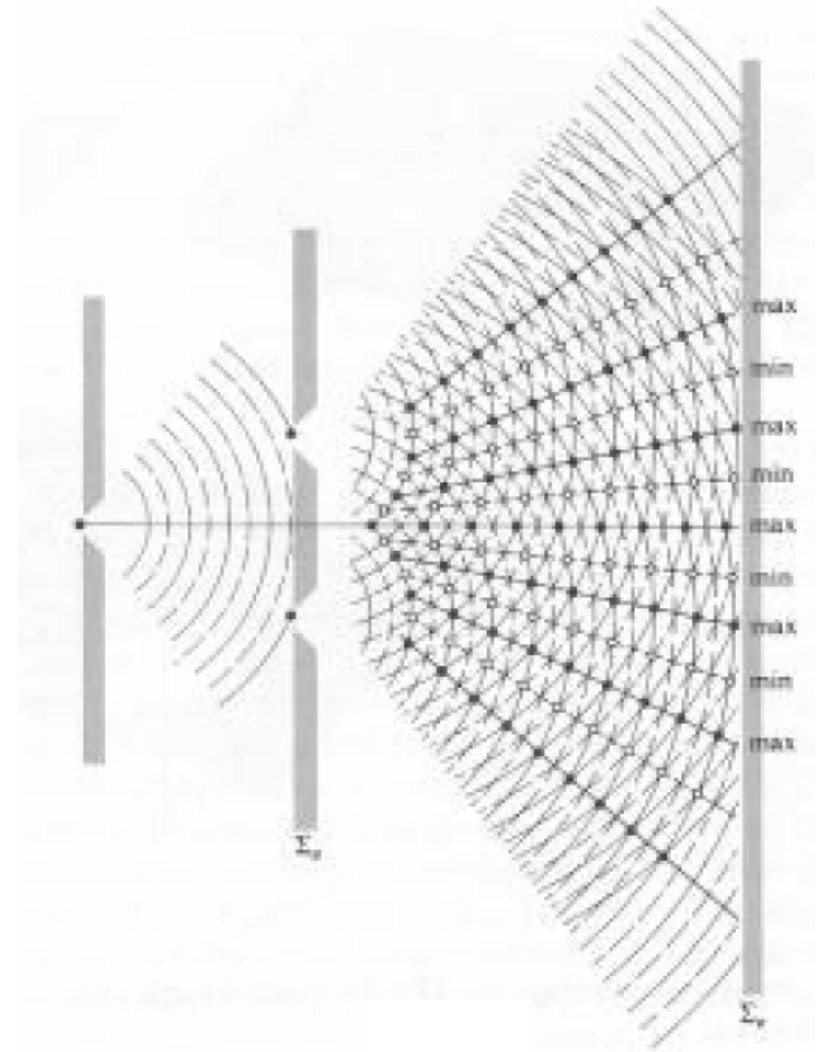
- CONSECUENCIA: La visibilidad de las franjas de interferencias es una función de las dimensiones de la fuente.

- **Medida del grado de coherencia espacial**

- La coherencia espacial es **medible**. Se observan las variaciones en la visibilidad de las franjas en un interferómetro por división del frente de ondas, en el cual se varían las dimensiones de la fuente.

Interferencias por división del frente de ondas: franjas de Young

- Realizado por Thomas Young (1773-1829).
- Luz cuasi-monocromática procedente de una fuente idealmente inextensa (por ejemplo: una rendija simple) que pasa por dos ranuras separadas una distancia d .
- Las interferencias se recogen en una pantalla situada a distancia $Z=L$ de las rendijas.
- Las franjas se localizan en la zona de superposición de los dos frentes de onda emitidos.
- Interferencias no localizadas.



Fundamentos

- La diferencia de camino óptico entre los rayos procedentes de las dos fuentes causa un desfase:

$$\delta = \Delta s \frac{2\pi}{\lambda} = d \sin \theta \frac{2\pi}{\lambda}$$

- Patrones de interferencia en la pantalla de observación:

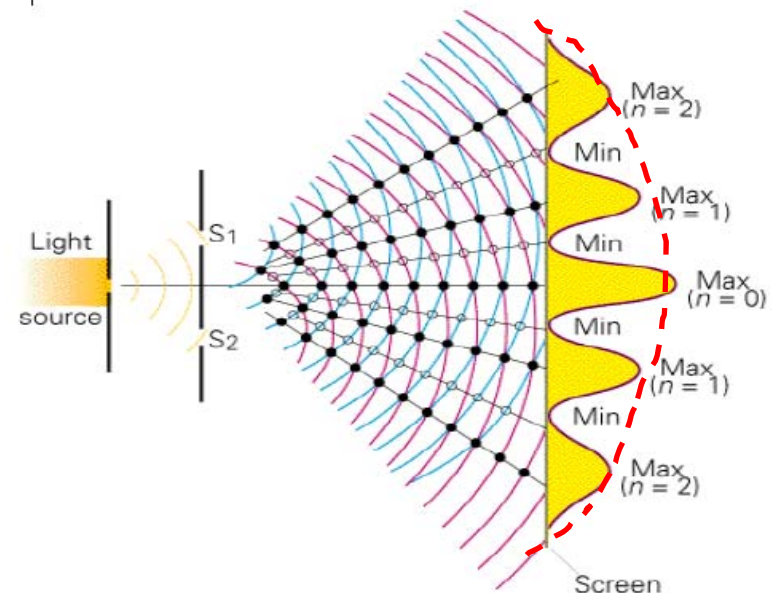
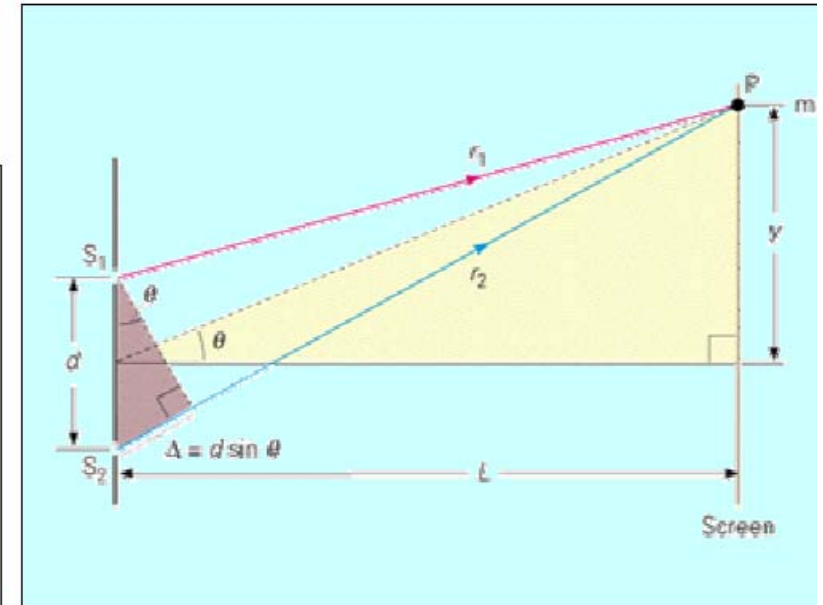
- Máximos

$$y_n = n \frac{L}{d} \lambda$$

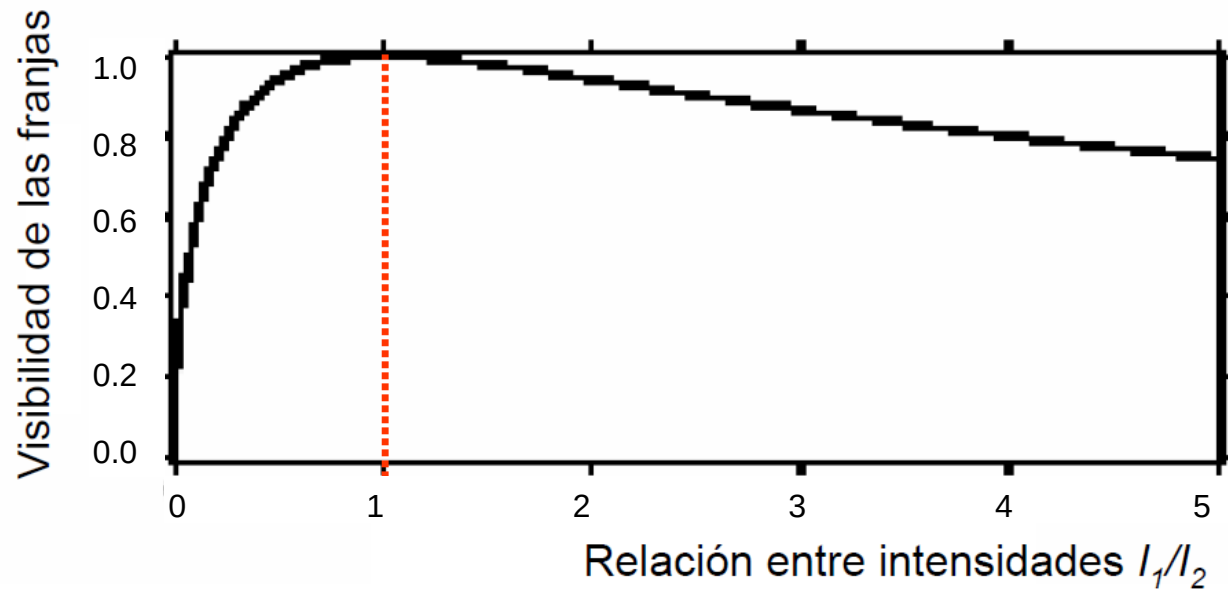
- Mínimos

$$y_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{L}{d} \lambda$$

- Interfranja: $\Delta y = L\lambda/d$

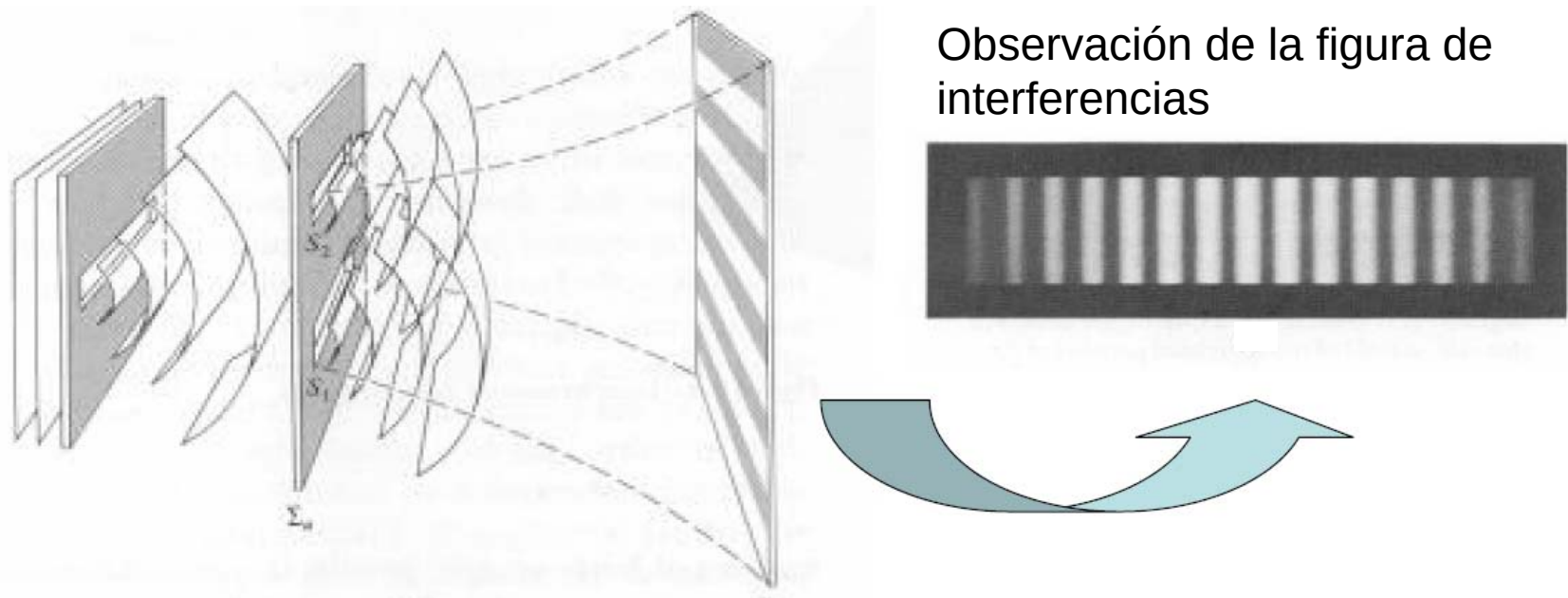


Contraste



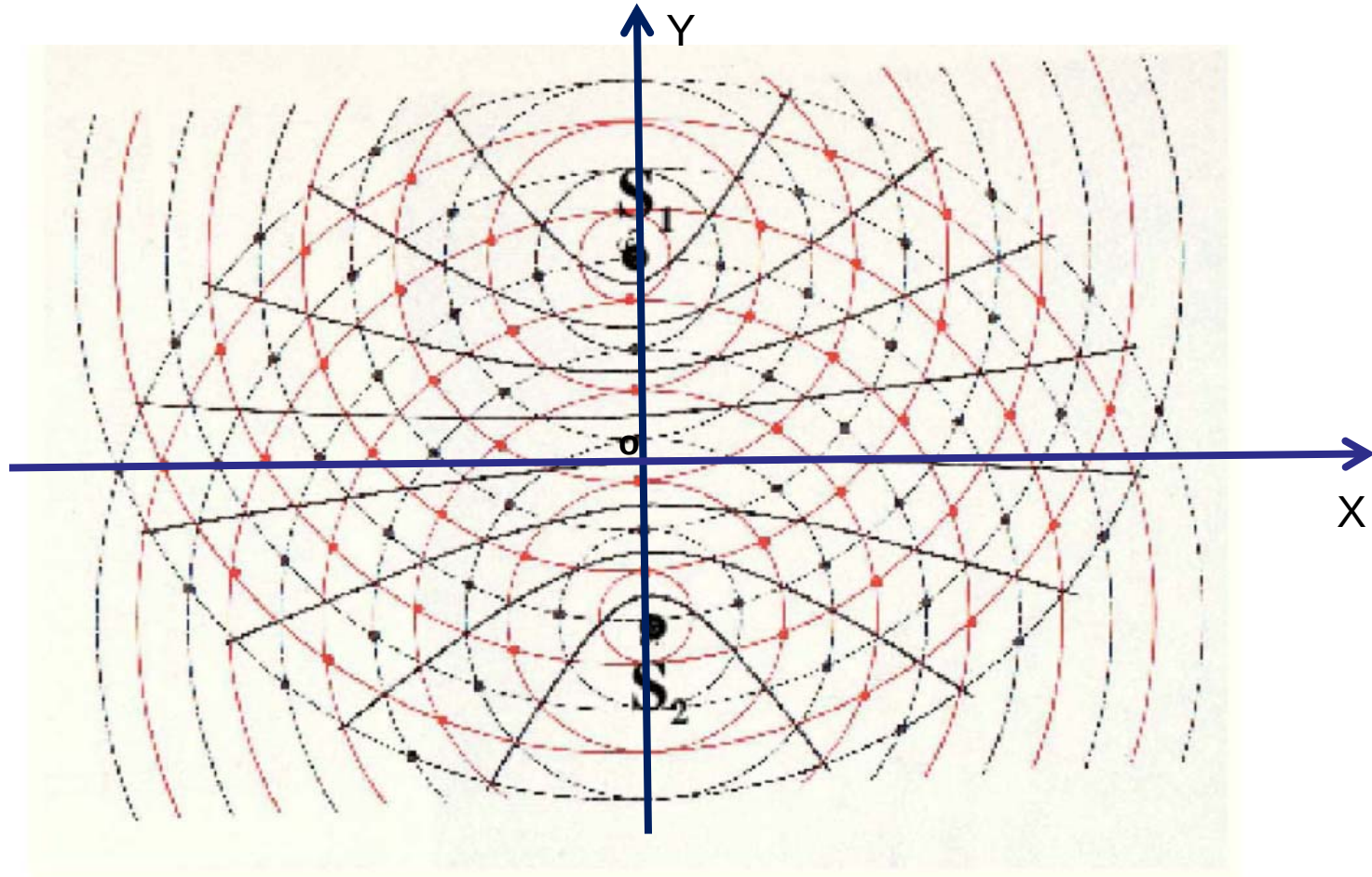
- El factor de contraste de las franjas de interferencia depende de las intensidades asociadas a la luz difractada emitida por las dos rendijas del experimento de Young.
- La máxima visibilidad de las franjas se obtiene cuando las dos intensidades coinciden. Para que se cumpla esta condición se debe de trabajar siempre con el mismo tipo de rendijas e iguales dimensiones. Por ejemplo: rendija rectangular.

Geometría de los frentes de onda generados en la doble rendija de Young



Se general frentes de onda cilíndricos si son rendijas rectangulares estrechas.

Otro tipo de aperturas difractivas: rendijas circulares



Las hipérbolas corresponden a las líneas donde las dos perturbaciones se superponen en oposición de fase. En todos los puntos situados en la mediatriz S_1S_2 la diferencia de camino óptico es nula (interferencia constructiva).

- Ecuación de una hipérbola con eje paralelo a OY:

$$r_2^2 - r_1^2 = 2xd$$

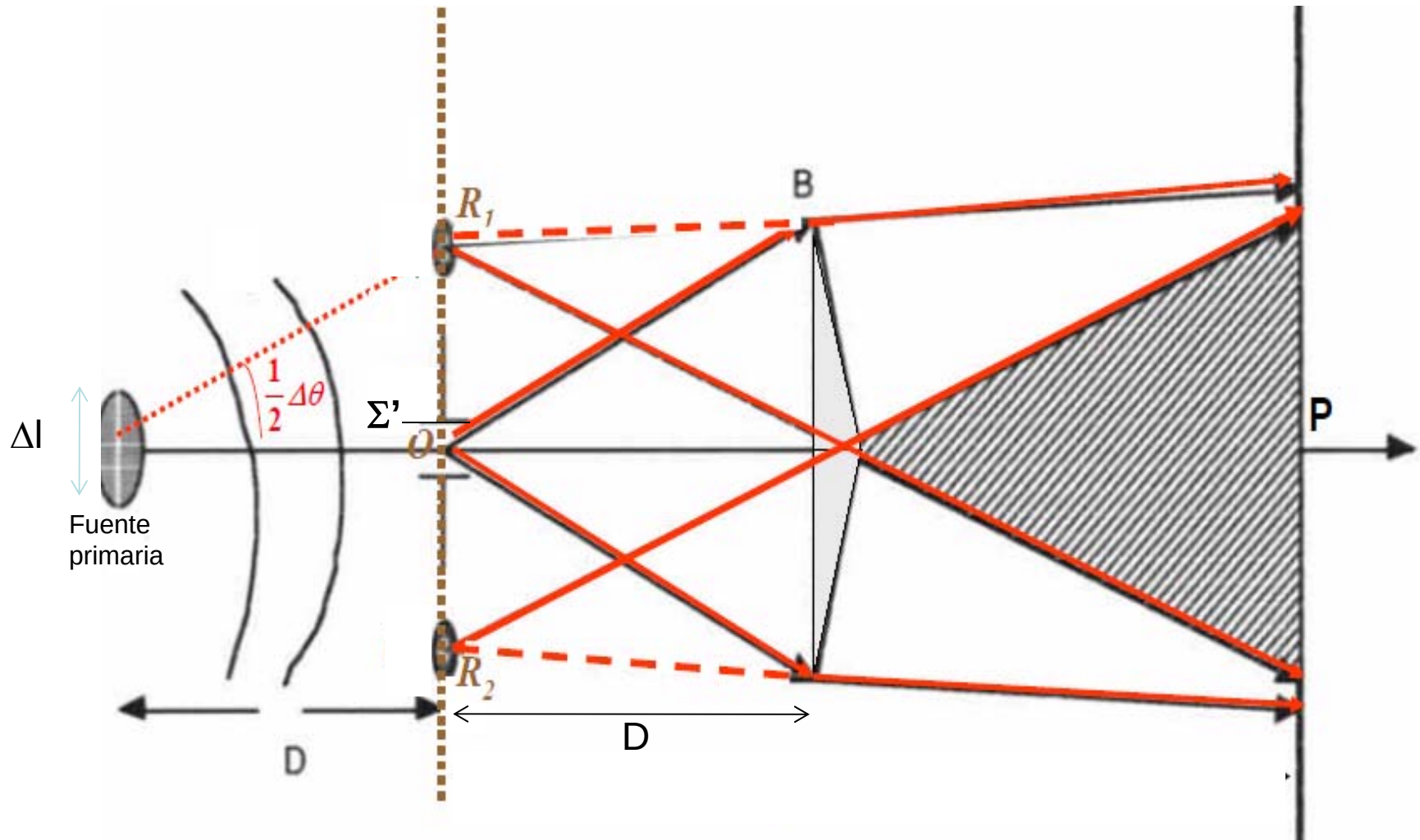
Grado de coherencia espacial y área de coherencia

- Consideramos un interferómetro por división del frente de onda, tipo doble rendija de Young: biprisma de Fresnel.
- Realizaremos un experimento con una fuente de luz *cuasi-monocromática*, fuente térmica y extensa.
- Luz *cuasi-monocromática* indica que la anchura media del espectro de emisión de la fuente: $\Delta\nu$ es pequeña comparada con la frecuencia media de emisión: ν_0 .

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \ll 1$$

- En el experimento del biprisma de Fresnel disponemos de una rendija de dimensión variable: Σ'
- La rendija se localiza a distancia D del biprisma .
- La fuente primaria extensa Σ tiene una anchura Δl .

Esquema del interferómetro para la observación del grado de coherencia espacial de una fuente de luz

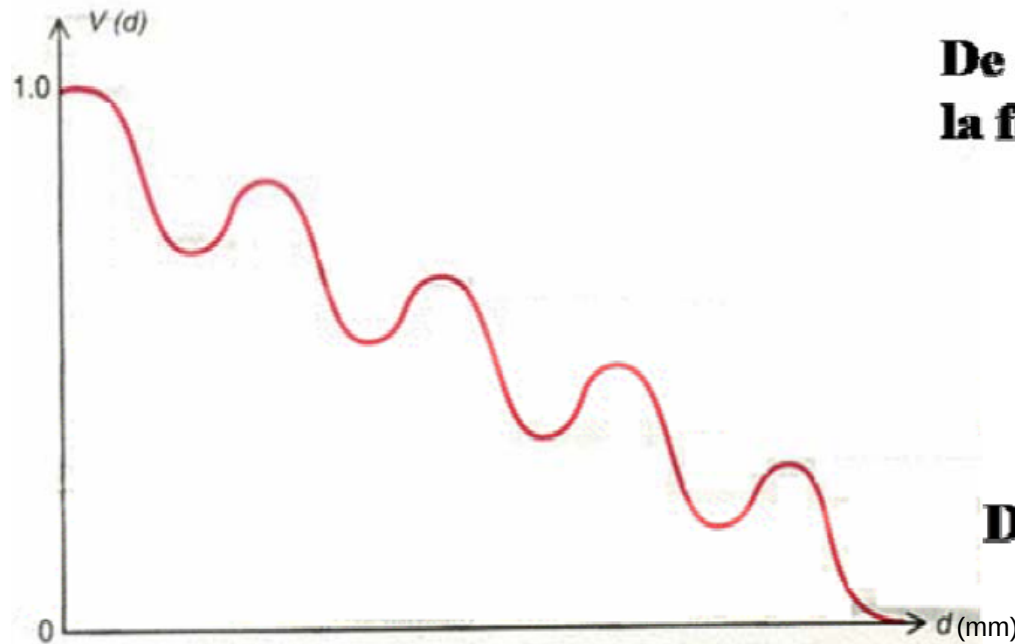


Condiciones de observación

- El biprisma forma dos imágenes virtuales R_1 y R_2 de la rendija real Σ' .
- Se supone que las dimensiones de las rendijas virtuales son mucho más pequeñas que Σ' .
- Se observan interferencia por división del frente de ondas en la zona central del punto P .
- La estructura (apariencia) de las franjas son un indicativo del grado de coherencia espacial de la fuente extensa.
- Ello es consecuencias de la dependencia del contraste de las franjas de interferencia con las dimensiones de las fuentes virtuales y separación entre ambas.
- Las interferencias se observan sólo si se cumple:

$$\Delta\theta\Delta l \leq \lambda_0$$

VARIACIÓN DE LA VISIBILIDAD DE LAS FRANJAS CON LAS DIMENSIONES DE LA RENDIJA Σ'



De forma aproximada representamos la función V :

$$V(d) = \left| \frac{\sin(k\rho)}{k\rho} \right|$$

Donde:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \rho = \frac{d(x_2 - x_1)}{z}$$

El grado de coherencia espacial sigue una ley de escala.

La fuente es quasi-monocromática, plana, secundaria quasi-homogénea

$x_2 - x_1$: distancia entre las dos fuentes virtuales R_1 y R_2

Discusión

- Cuanto mayor es la dimensión de la fuente menor es la coherencia espacial.
- El caso ideal de visibilidad máxima: $V=1$ corresponde a: $k\rho=0$, d próximo a cero.
- La visibilidad mínima corresponde a valores de $k\rho = \pi$. Se puede tomar un criterio visual para $V_{\min}$:

$$V_{\min} = 0,6; \quad k\rho \leq \frac{\pi}{2}$$

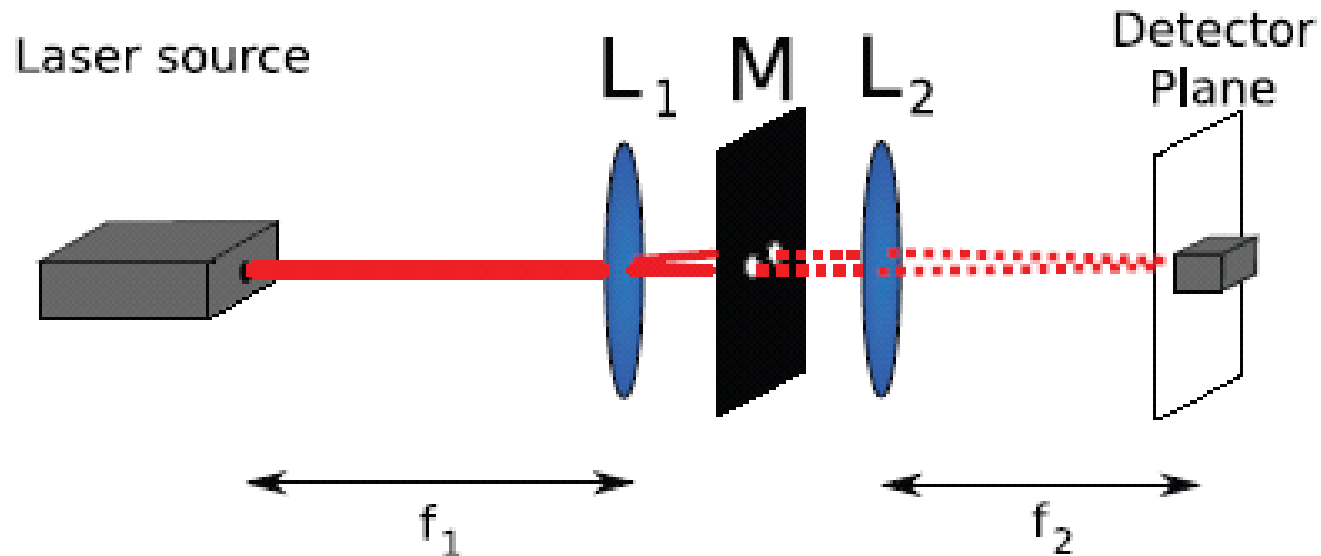
Definición de área de coherencia

- Sea D la distancia entre el plano de la fuente y el plano del interferómetro.
- La observación de las franjas con visibilidad no nula, alrededor del punto P , está asegurada si las dos fuentes virtuales R_1 y R_2 están localizadas en una región alrededor de O , de área ΔA no nula definida:

$$\Delta A \sim (D\Delta\theta)^2 \sim D^2 \frac{\bar{\lambda}^2}{\Sigma}$$

Siendo Σ el área de la fuente. Se observa que el área de coherencia aumenta con la distancia D y disminuye con el tamaño de la fuente.

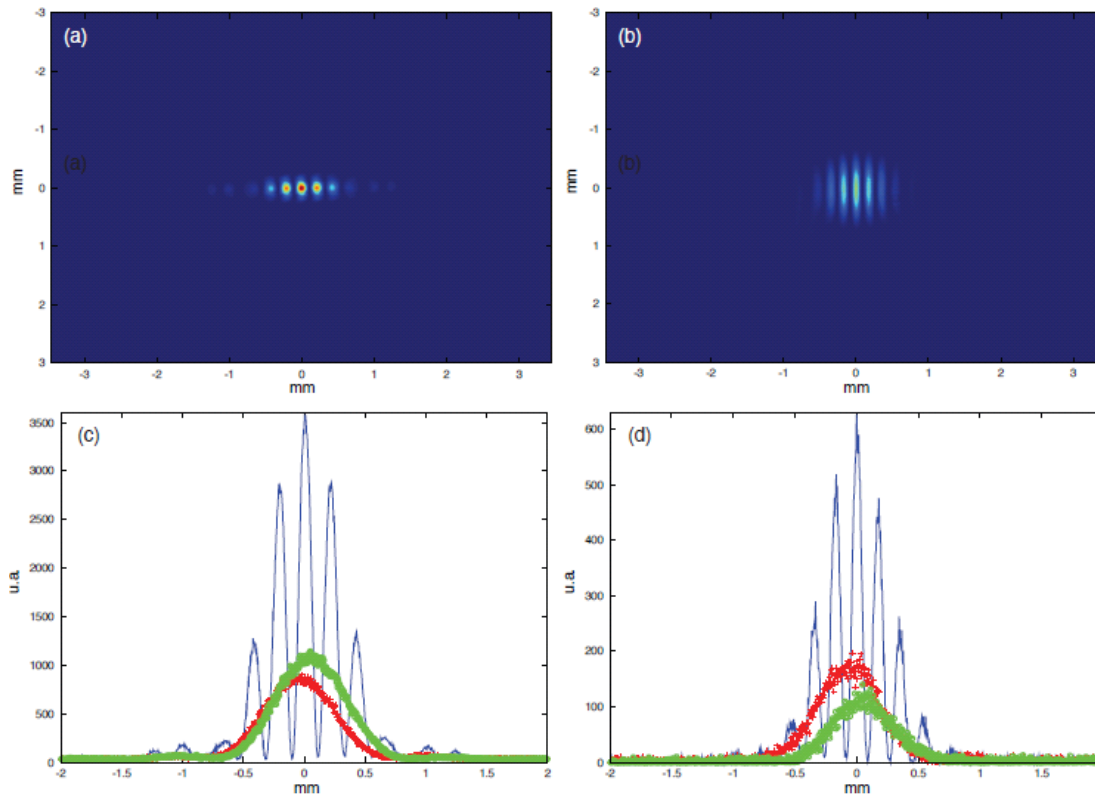
Un experimento clásico para la determinación del grado de coherencia espacial de una fuente: el experimento de Thompson-Wolf (*)



Fuente: se pueden utilizar distintas fuentes láser, por ejemplo, punteros láser emitiendo en: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ o bien en: $\lambda = 532 \text{ nm}$. Potencia de salida: 40 mW - 50 mW. Distancia focal de la lente colimadora: 100 cm, y L_2 : 50 cm. M : máscara con doble rendija. Posibles geometrías: rectangular (anchura: 0.5 mm, 1.5 mm); circular (diámetro 0.5 mm y 2 mm separación). Plano de detección: cámara CCD.

(*): B. Thompson and E. Wolf, "Two-Beam Interference with Partially Coherent Light," J. Opt. Soc. Am **47** 895 (1957).

Resultados experimentales con una fuente de He-Ne



Datos: Fuente láser: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ y 40 mW :

(a) y (b) figuras de interferencias.

(c) y (d), perfiles de línea. (a) Doble rendija rectangular (anchura: 0.05 cm, separación: 0.15 cm). (b) doble rendija circular (anchura: 0.05 cm, separación: 0.2 cm).

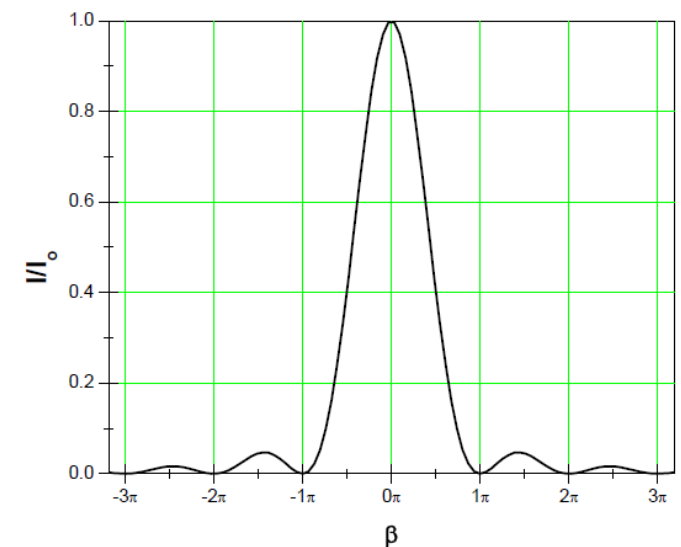
Gráfica en verde: Una única rendija centrada.

Gráfica en rojo: la segunda rendija.

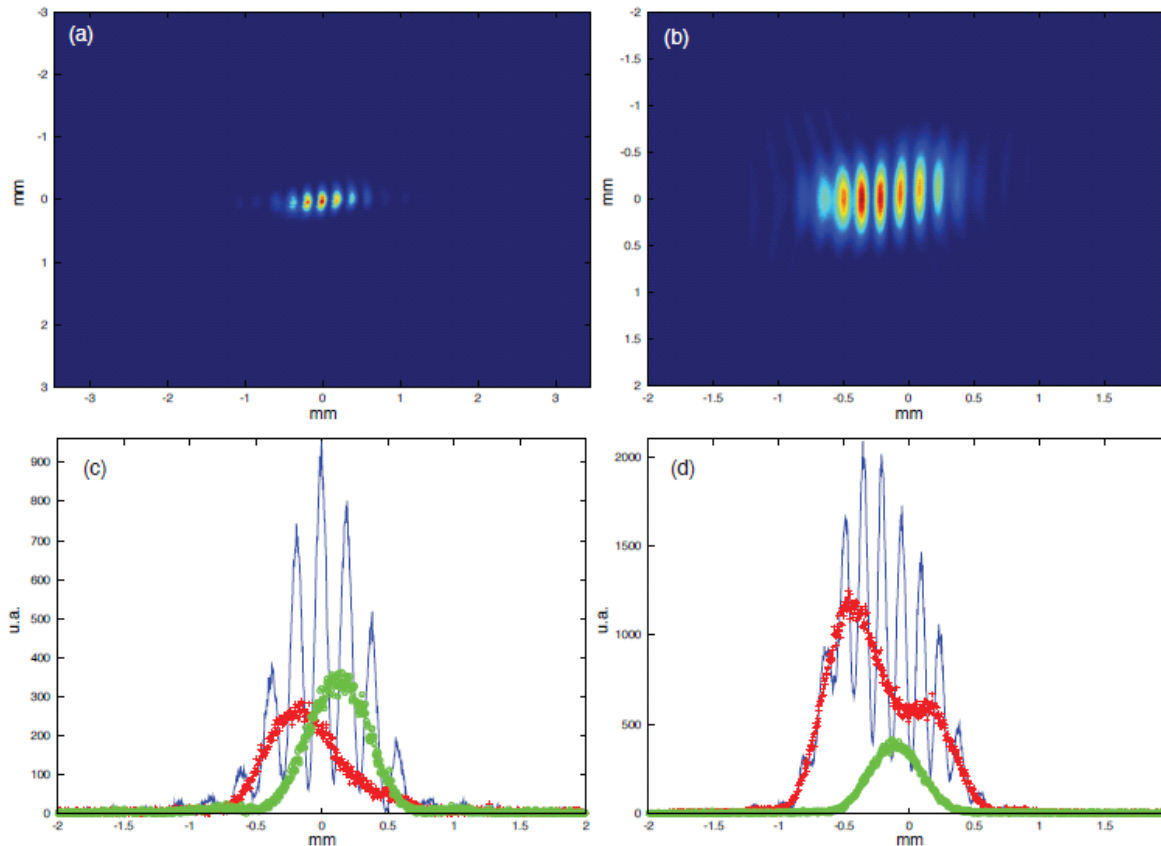
Visibilidad de las franjas:

- La máxima visibilidad se obtiene cuando las intensidades producidas por cada una de las rendijas son iguales.
- Obsérvese que, por ejemplo, la envolvente del perfil de línea para el caso de rendijas rectangulares se ajusta a una función *sinc*.

Módulo de la función *sinc*



Resultados experimentales con un puntero láser como fuente de luz



Comparación de resultados:

- El puntero láser produce una figura de interferencias que indica presencia de un régimen modal no mono-modo (como en el caso del láser de He-Ne).
- Para una fuente con régimen multi-modo el grado de coherencia espacial no es máximo.
- Este resultado es una confirmación de que la aproximación de segundo orden para la correlación de campos es correcta.

Datos: Puntero láser: $\lambda = 532 \text{ nm}$) y 50 mW.

(a) y (b): figuras de interferencias.

(c) y (d): perfiles de línea.

a) Doble rendija rectangular (anchura: 0.05 cm, separación: 0.15 cm).

(b) doble rendija circular (anchura: 0.05 cm, separación: 0.2 cm).

Gráfica en verde: Una única rendija centrada.

Gráfica en rojo: la segunda rendija.



P. H. Van Cittert

Teorema de Van-Cittert Zernike



F. Zernike, premio
Nóbel de física 1953

<< La propagación de la densidad espectral mutua (transformada de Fourier de la función de coherencia mútua) se expresa en términos de una integral para la difracción, en regimen de propagación en campo lejano, de la densidad espectral mútua asociada a una fuente de luz extensa, plana, cuasi-homogénea, cuasi-monocromática y emitiendo en condiciones de incoherencia >>.

$$\begin{aligned}
 & \overleftrightarrow{W}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \omega) \\
 &= \iint \mathbf{K}_\perp^\dagger(\vec{\rho}_1, \vec{r}_1, \omega) \circ \overleftrightarrow{W}_\perp^{(0)}(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \omega) \circ \mathbf{K}_\perp(\vec{\rho}_2, \vec{r}_2, \omega) d^2\vec{\rho}_1 d^2\vec{\rho}_2 \\
 &= B \frac{1}{(\lambda f_1)^2} \iint \overleftrightarrow{W}^{(0)} \exp \left[\frac{ik}{f_1} (\rho_2 r_{2\perp} - \rho_1 r_{1\perp}) \right] d^2\vec{\rho}_1 d^2\vec{\rho}_2
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

densidad espectral mutua
operador asociado a
asociada a la fuente
la transformada de Fourier

Muchas gracias por la
amable atención