

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

Prof. María L. Calvo

30th April/30 de abril 2012

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

Universidad Complutense de Madrid (UCM)



Fachada de la Facultad de Ciencias Físicas

História:

- Fundada en 1499 in Alcala de Henares (antiguo sitio romano *Complutas*, 30 Km. al norte de Madrid).
- En 1509-1510: Cinco facultades, arte y filosofía, teología, leyes, humanidades y medicina.
- En 1836 se trasladó a Madrid: Universidad Central.
- En 1927 se creó el campus de la Ciudad Universitaria.

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.

Una definición para la coherencia óptica

A partir de Mandel y Wolf (1965):

« Aptitud de una fuente de radiación para generar fenómenos de interferencias »

A partir de Hanbury Brown et Twiss (1956)

« Conjunto de propiedades estadísticas entre los elementos de los campos ópticos »

Tratamiento clásico: Correlación clásica

Radiación electromagnética: fuentes de radiación

- Las propiedades de las fuentes luz están asociadas a la naturaleza del espectro de emisión.
- El láser es el ejemplo de fuente de luz con menor anchura media del espectro.
- Un láser pulsado (Ti:Zafiro), 35 fs de pulso, emite con una anchura media del espectro (transformada límite temporal) de 10-15 THz, espectro centrado en 375 THz, y emisión a 800 nm.
- Las fuentes de luz, en general, son térmicas.

Fuentes de radiación térmicas

- Ley de Planck:
- Radiancia espectral:

$$R_v(T) = \frac{c}{4} \rho_v(T)$$

$$\rho_v(T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp\left[\frac{h\nu}{K_B T}\right] - 1}$$

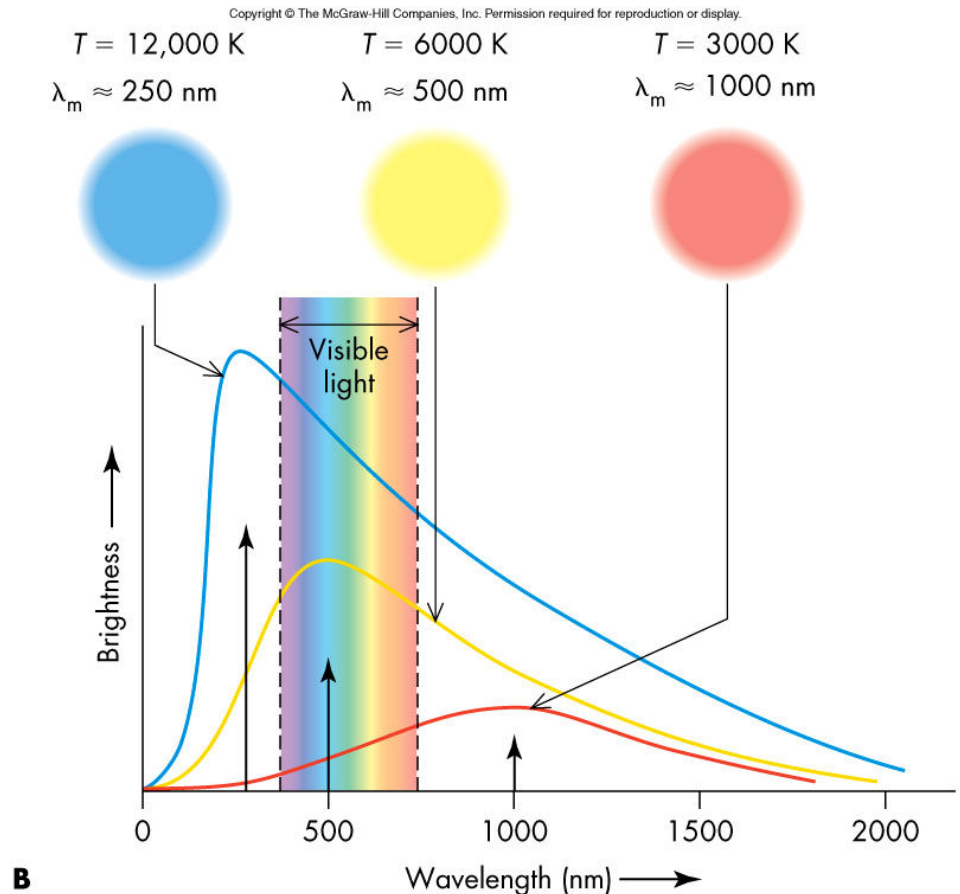
h : constante de Planck

$h=6,62606876 \text{ Js}$

K_B : constante de Boltzman

$K_B=1,3806503 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

$\rho_v(T)$: energía por unidad de volumen y de intervalo de frecuencia



Ley de Wien

- Densidad de energía por unidad de volumen y de intervalo de longitud de ondas:

$$\tilde{\rho}_{\lambda}(T)d\lambda = \rho_{\nu}(T)d\nu$$

Para T dada $\tilde{\rho}_{\lambda}(T)$ tiene un máximo:

$$\lambda = \lambda_{\max};$$

$$\lambda_{\max}T = 2,898 \times 10^{-3} \quad (\mathbf{m.K})$$

Tipos de espectros de fuentes de luz

Continuous

A



Emission line (hydrogen gas)

B

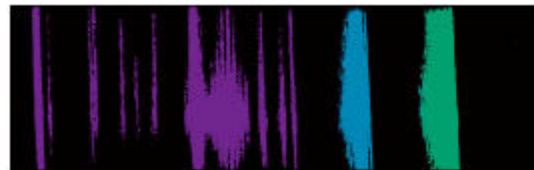


Absorption line (hydrogen gas)

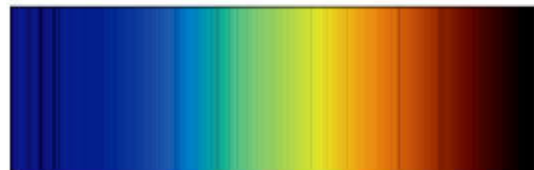
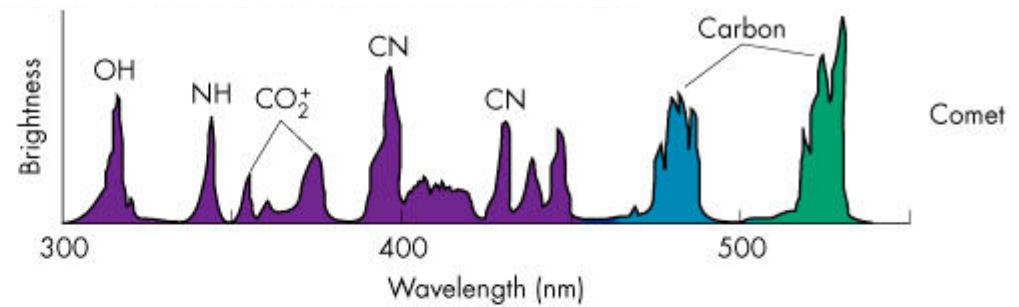
C



Fuentes naturales

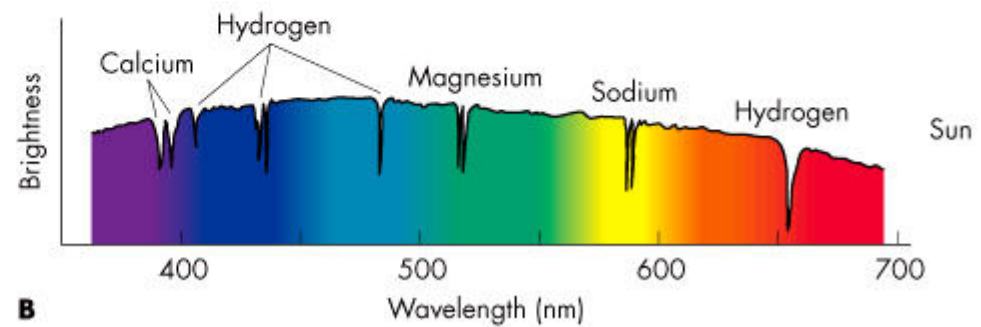


Spectrum of a comet



Solar spectrum

A



B

Efectos de la coherencia espacio-temporal de una fuente

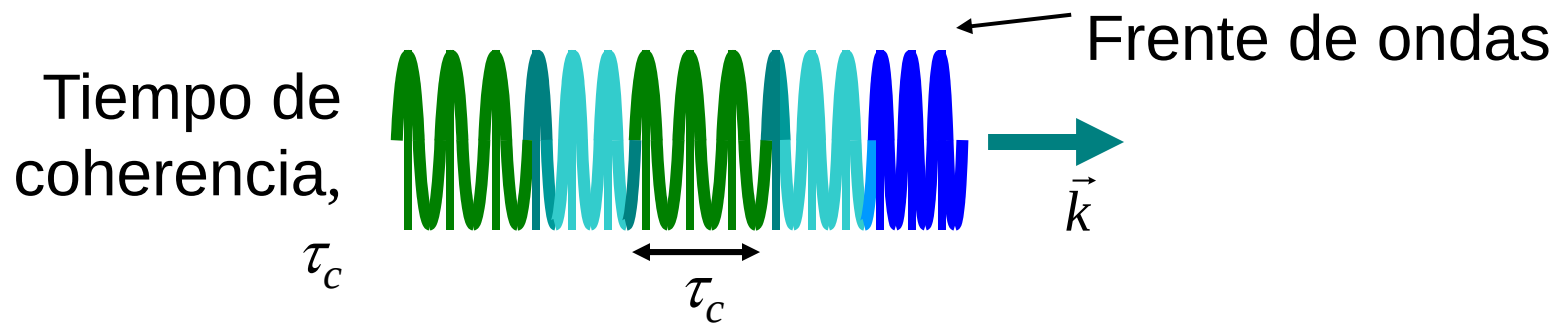
Demostración de la correlación espacial y temporal de los campos ópticos

¿Cuál es el orden de la descripción estadística?

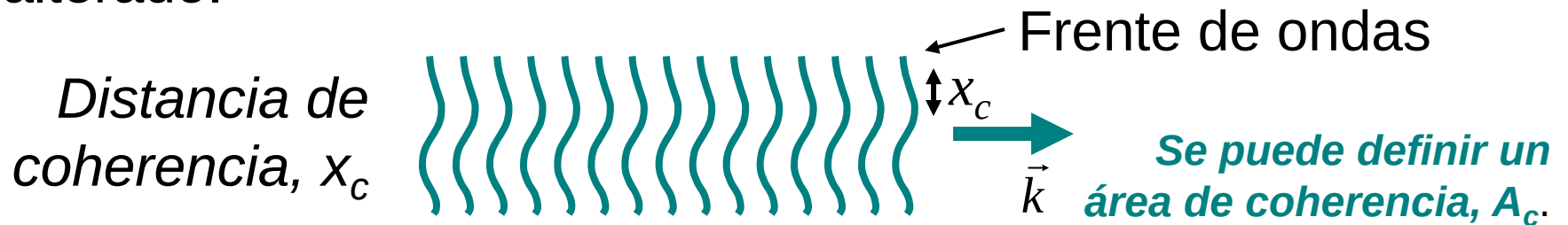
Proporciona información sobre el orden de correlación de los campos y de los fenómenos físicos asociados

Tiempo de coherencia y coherencia espacial

El tiempo de coherencia está asociado a la longitud del tren de ondas sinusoidal monocromático:



La coherencia espacial se mide como la distancia transversal para la cual la geometría del frente de ondas permanece inalterado.



Coherencia temporal

Teoría electromagnética :

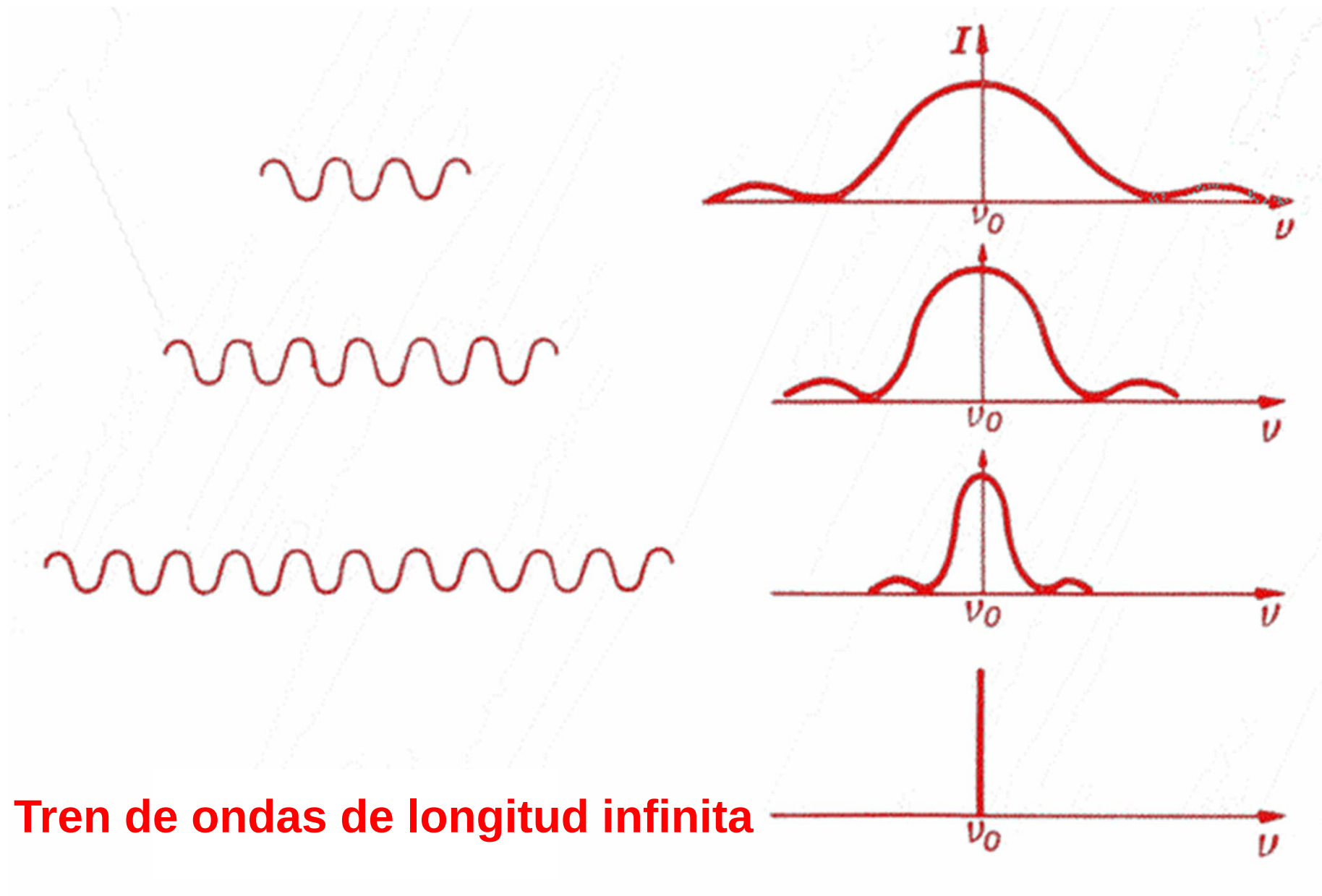
Los átomos de una fuente luminosa emiten vibraciones que tienen una duración.

Emisión: Origen de los **trenes de ondas**.

La longitud de los trenes de ondas finitos es **medible**

Supondremos un **interferómetro de Michelson** iluminado por una fuente de pequeñas dimensiones. La fuente emite luz no monocromática.

Los fenómenos de interferencias son perfectamente visibles cuando la **coherencia temporal** no es nula.



Grado de coherencia de segundo orden: Función de correlación de segundo orden

De forma general se puede caracterizar la manifestación de los fenómenos de interferencia por la función de coherencia mutua:

$$\Gamma(\bar{r}_1, t_1; \bar{r}_2, t_2) = \langle E^*(\bar{r}_1, t_1) E(\bar{r}_2, t_2) \rangle$$

El símbolo $\langle \rangle$ representa un valor medio tomado sobre todas las « realizaciones » posibles de « proceso » :

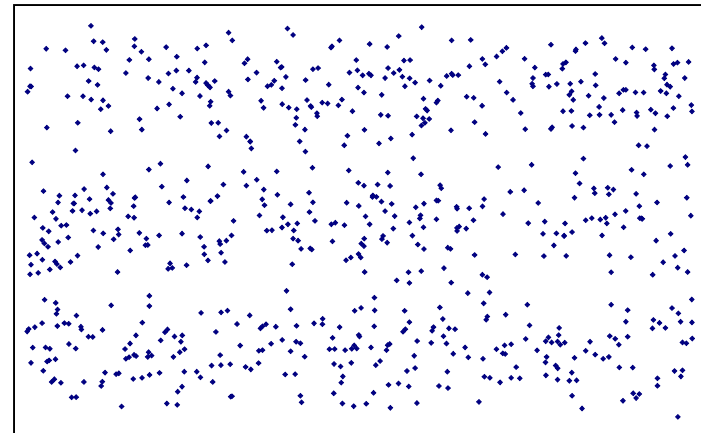
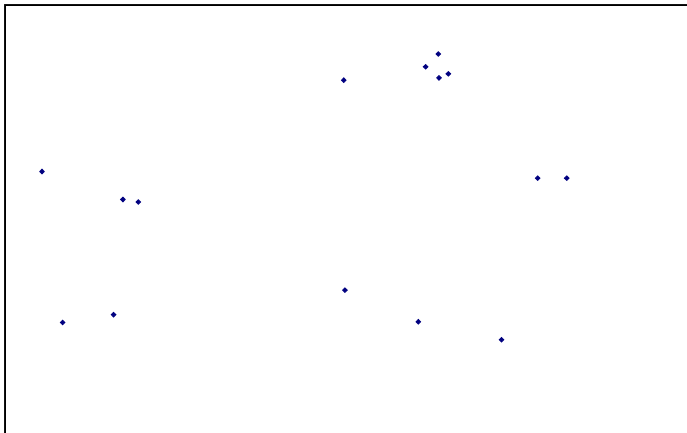
Distribución en el sentido estadístico: **Media de conjunto.**

Interferencias de primer orden

Interferencias y fotones: Antecedentes

Taylor (1909) : Experimento de Young con una fuente de baja inten.

("a candle burning at a distance slightly exceeding a mile")



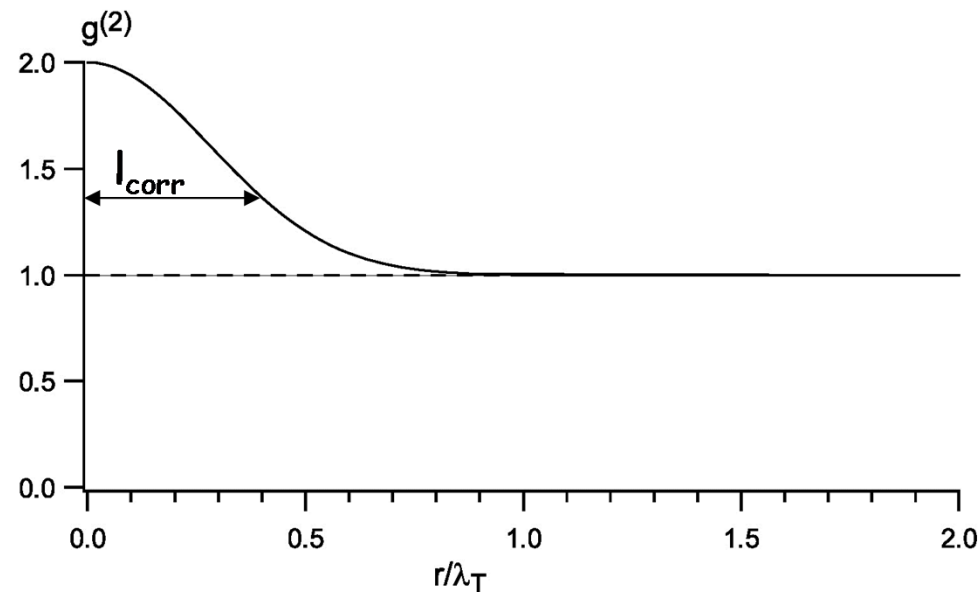
————— Tiempo de exposición —————>

"each photon then interferes only with itself", Dirac

Ejemplo de correlación de fotones (bosones)

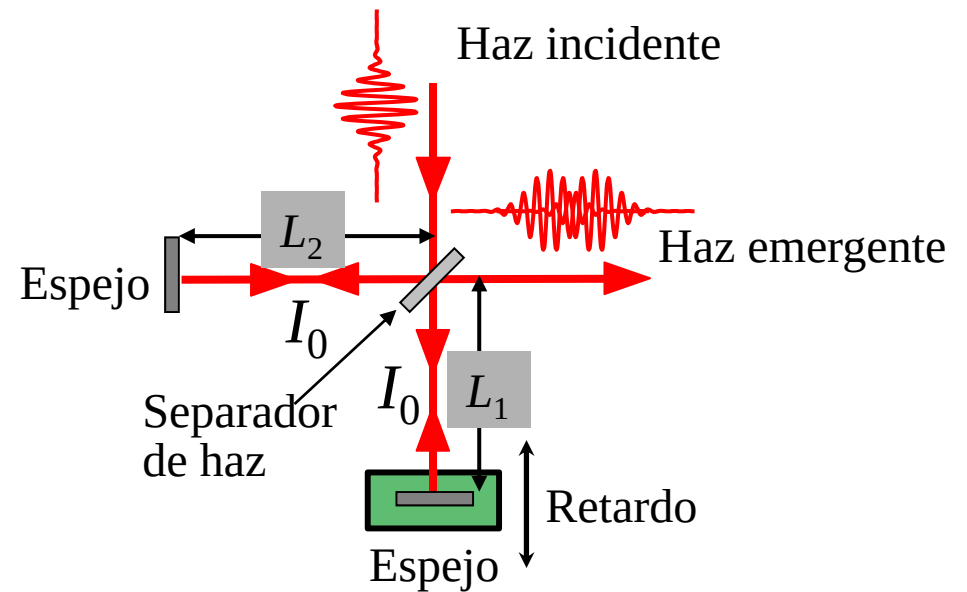
Correlación e independencia:

Pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de detectar una partícula τ segundos después de otra?



Interferómetro de Michelson

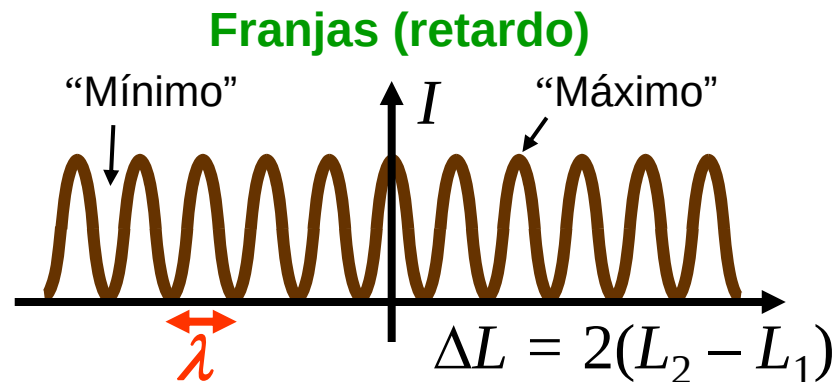
Es un interferómetro que opera por división de amplitud.



$$I_{out} = 2I_0 + 2I_0 \cos(\omega\tau) = 2I_0 + 2I_0 \cos(k\Delta L)$$

Donde: $\Delta L = 2(L_2 - L_1)$

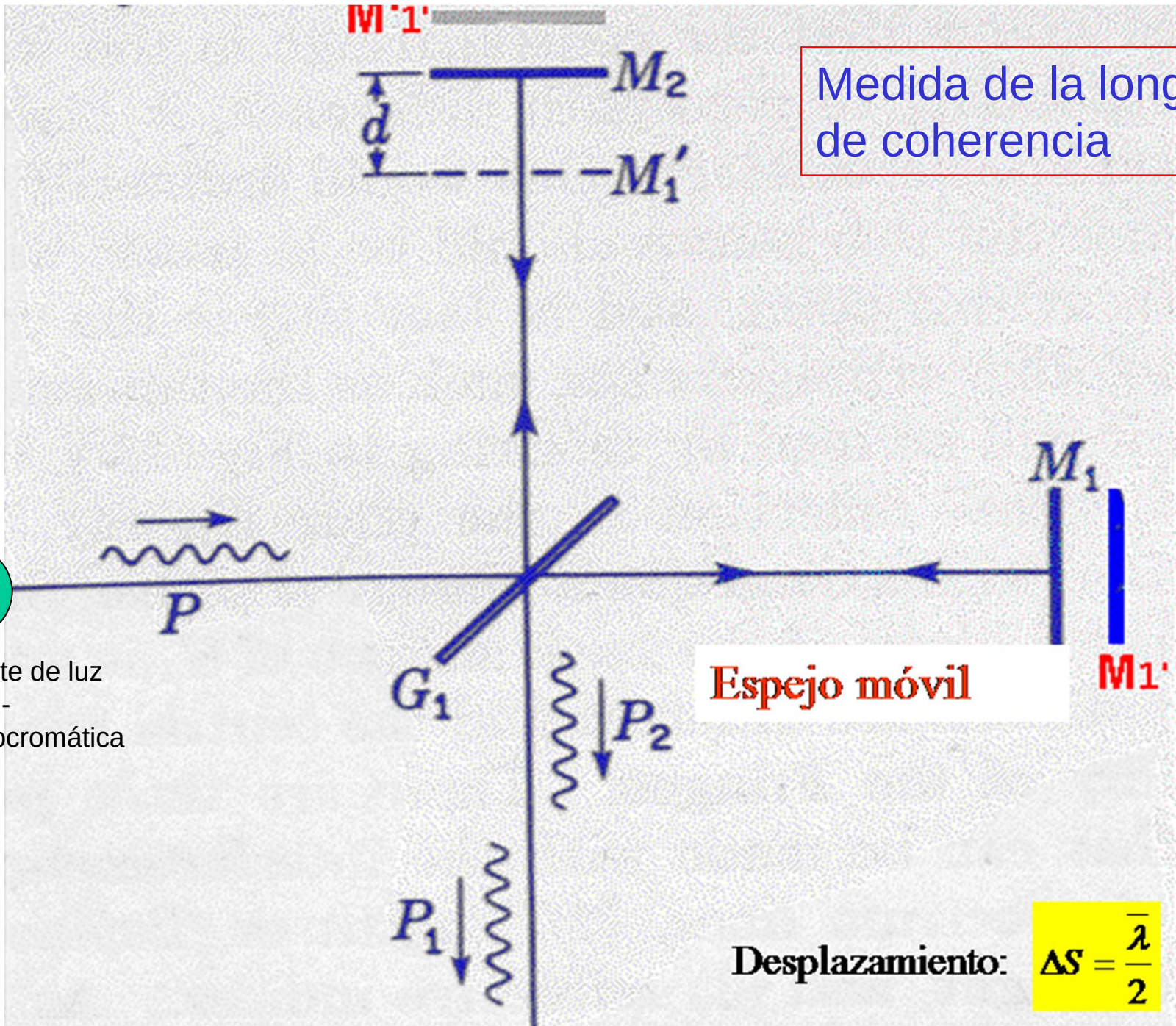
Proporciona una medida de la longitud de onda.



Medida de la longitud de coherencia



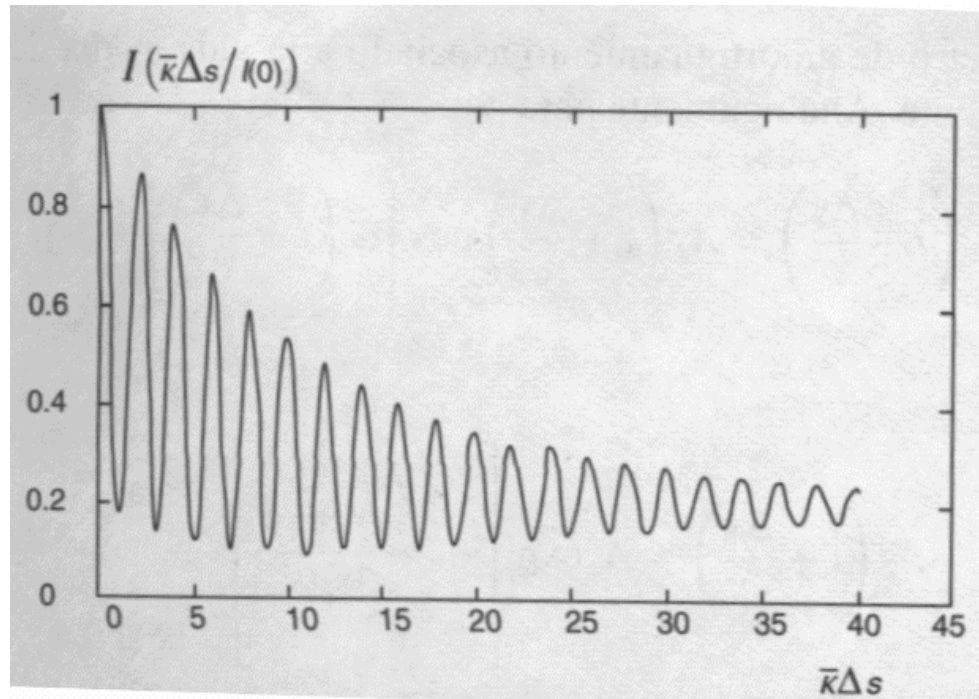
Fuente de luz
cuasi-
monocromática



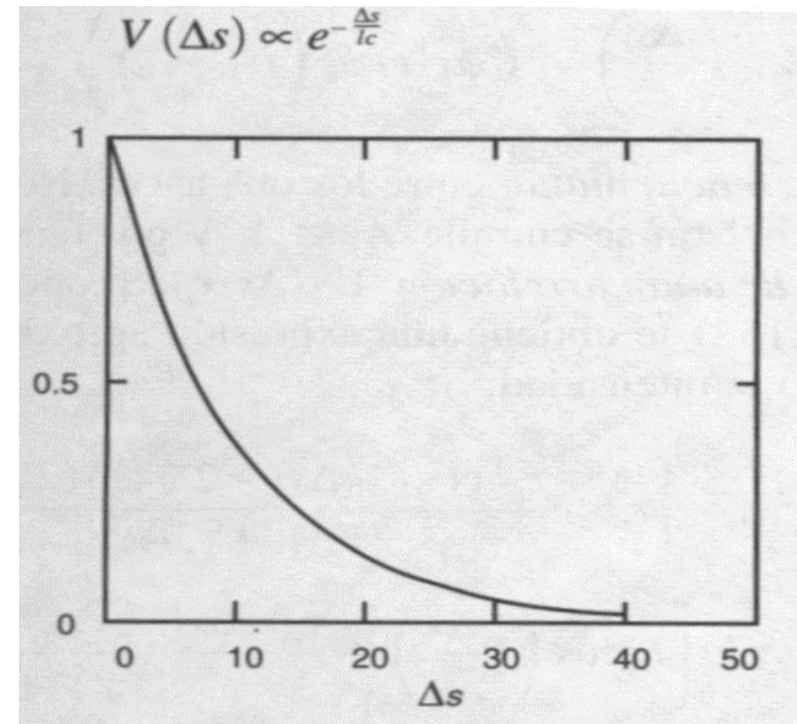
Espejo móvil

Desplazamiento: $\Delta S = \frac{\lambda}{2}$

INTERFEROGRAMA



VISIBILIDAD



CONDICIONES DE OBSERVACION:

$$2d \leq c\tau_c \leq l_c$$

VISIBILIDAD:

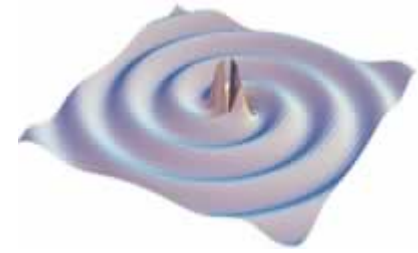
$$V(\Delta s) \propto \exp\left(-\frac{\Delta s}{l_c}\right)$$

En nuestro experimento: $l_c = 8 \text{ mm.}$; $\tau_c = 3 \times 10^{-11} \text{ s} = 3 \times 10^{-2} \text{ ns}$

Donde: $\tau_c \Delta \nu \leq 1$

; $\Delta \nu$: anchura de banda

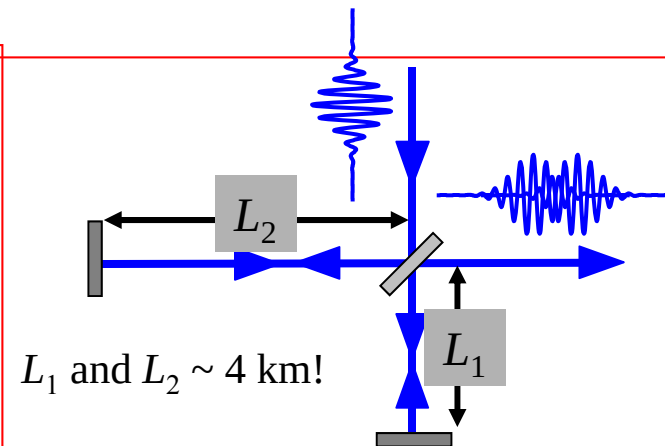
Aplicaciones del interferómetro de Michelson: detección de ondas gravitacionales



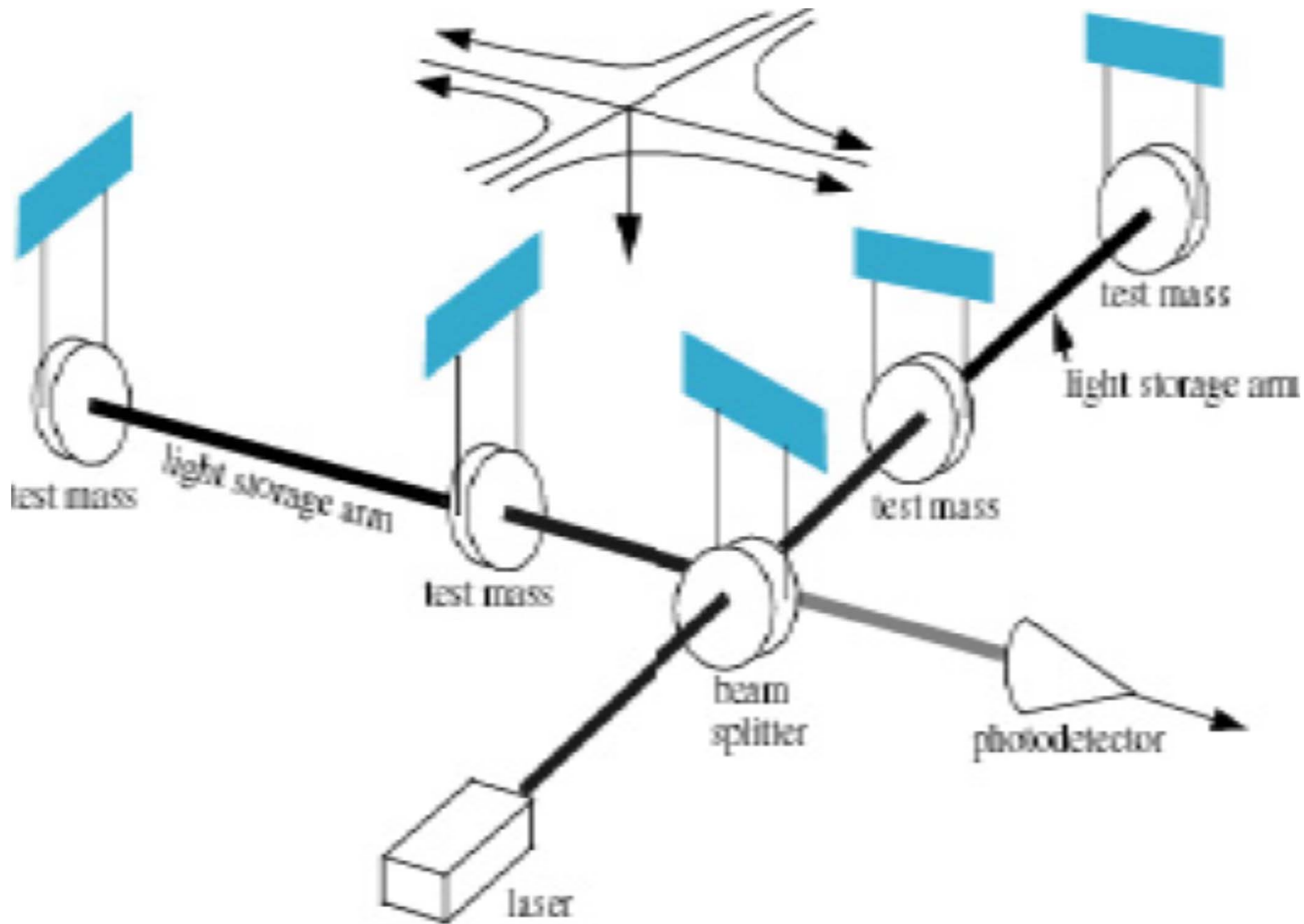
- Las ondas gravitacionales (emitidas por objetos estelares masivos) distorsionan el espacio-tiempo. La relatividad predice su existencia. Su detección está aún por desarrollar.
- Las supernova y los agujeros negros emiten ondas gravitacionales detectables.

Las ondas gravitacionales son “cuadrupolos”, que distorsionan el espacio en dos sentidos.

Este efecto se puede reproducir en los brazos del interferómetro, aumentando ΔL .



La distancia ($\Delta L \sim 10^{-16}$ cm) es tan pequeña que la medida es muy difícil. Diferencia de fase: 10^{-10} radianes.



La presencia de las ondas gravitacionales produce un retardo temporal al alargarse uno de los brazos del interferómetro y encogerse el otro.

LIGO: Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory Livingston (Luisiana, EEUU)

