Medición óptica de la transformada fraccional de Fourier

Universidad de los Andes · Facultad de Ciencias, Departamento de Física

Santiago Usuga, Jose Mejía, Sebastián Menjura y Alejandra Valencia
Laboratorio de óptica cuántica, Universidad de los Andes, Bogotá D.C –Colombia
s.usuga@uniandes.edu.co

Laboratorio de óptica cuántica
Facultad de ciencias | Departamento de física

Resumen

En los últimos años se han realizado grandes avances en la preparación, propagación y detección de luz. Esto ocurre no solo para fuentes de luz que se encuentran en la vida cotidiana, como la luz de bombillo o un láser, sino también para fuentes de luz que trabajan a nivel cuántico como fuentes de un solo fotón. Al estudiar las propiedades de estas últimas, se han desarrollado aplicaciones en computación cuántica, metrología cuántica, medidas de precisión, etc. Dicho estudio se puede realizar mediante la función de Wigner, la cual permite la representación de un estado en el espacio de fase. Esta función es accesible experimentalmente. En este trabajo, se implementó un montaje óptico para reconstruir la función de Wigner espacial de dos haces gaussianos, la cual se puede obtener al medir las transformadas fraccionales de la señal. Este perfil espacial de la luz es interesante ya que su función de Wigner presenta el mismo comportamiento que la de un estado de gato [1][2].

Marco teórico

Transformada fraccional de Fourier (FFT): Es una generalización de la transformada de Fourier ordinaria asociada con un parámetro a. Este parámetro indica el número de veces que se aplica el operador de la transformada de Fourier.

$$F^{\theta}\{f(t)\} = \frac{e^{i\left(\frac{\theta}{2}-\frac{\pi}{4}\right)}}{\sqrt{2\pi\sin(\theta)}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{-i\left(u\csc(\theta)t-\cot(\theta)\frac{(t^2+u^2)}{2}\right)}dt$$

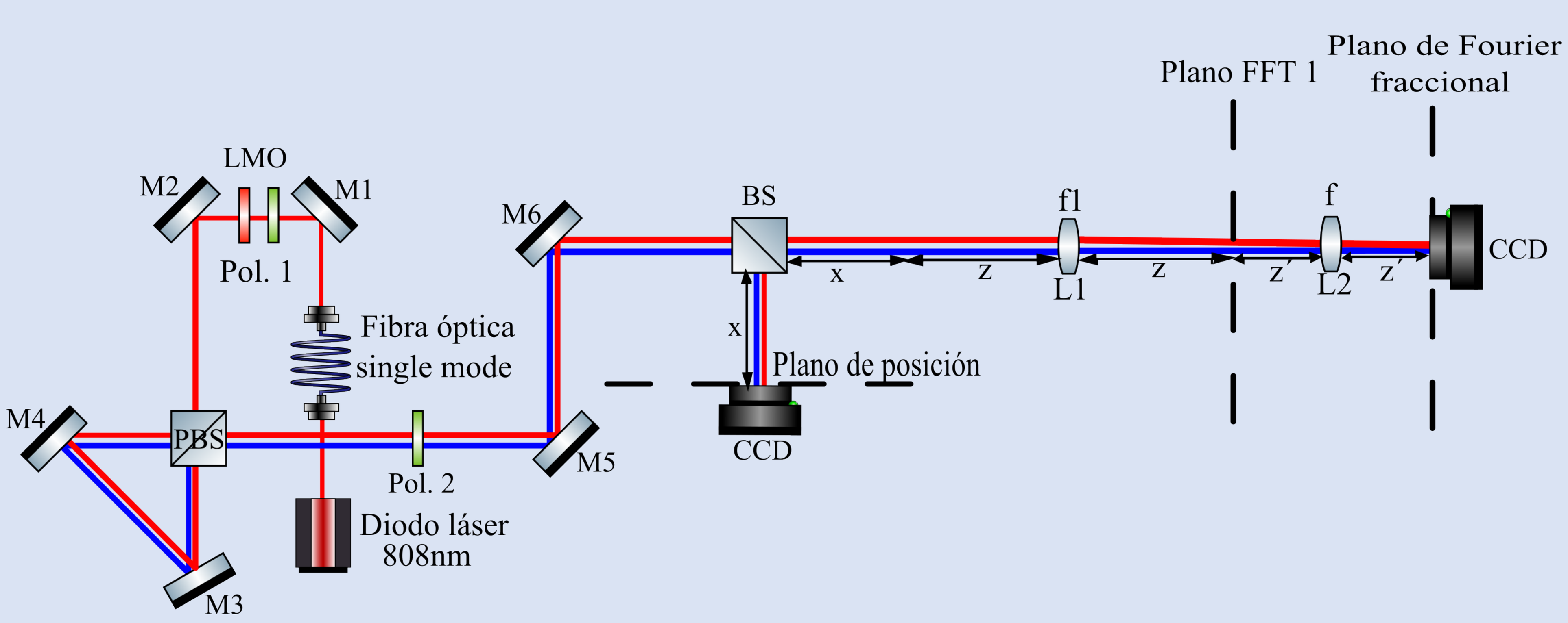
Transformada de Radón: Este operador proyecta cualquier función $\psi(y)$ en el espacio de fase sobre un eje que hace un ángulo θ con respecto al eje de la variable "y". Al aplicar esta transformación a la función, se obtiene su distribución marginal para la cuadratura asociada con el ángulo θ.

$$p(\theta,s) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\,\delta(x\cos(\theta)+y\sin(\theta)-s)\,dx\,dy$$

Función de Wigner (WF): Distribución de probabilidad en el espacio de fase asociada a la función de onda que se obtiene a partir de la ecuación Schrödinger. Se le denomina distribución de cuasiprobabilidad dado que puede tomar valores negativos, los cuales están conectados con la relación de incertidumbre de Heisenberg. Asimismo, el valor esperado de cualquier observable se puede calcular a partir de esta función.

$$W(y,q_y) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\psi^*\left(y-\frac{y'}{2}\right)\psi\left(y+\frac{y'}{2}\right)e^{-iq_y y'}dy'$$

Implementación óptica de la FFT



Relación entre FFT y WF

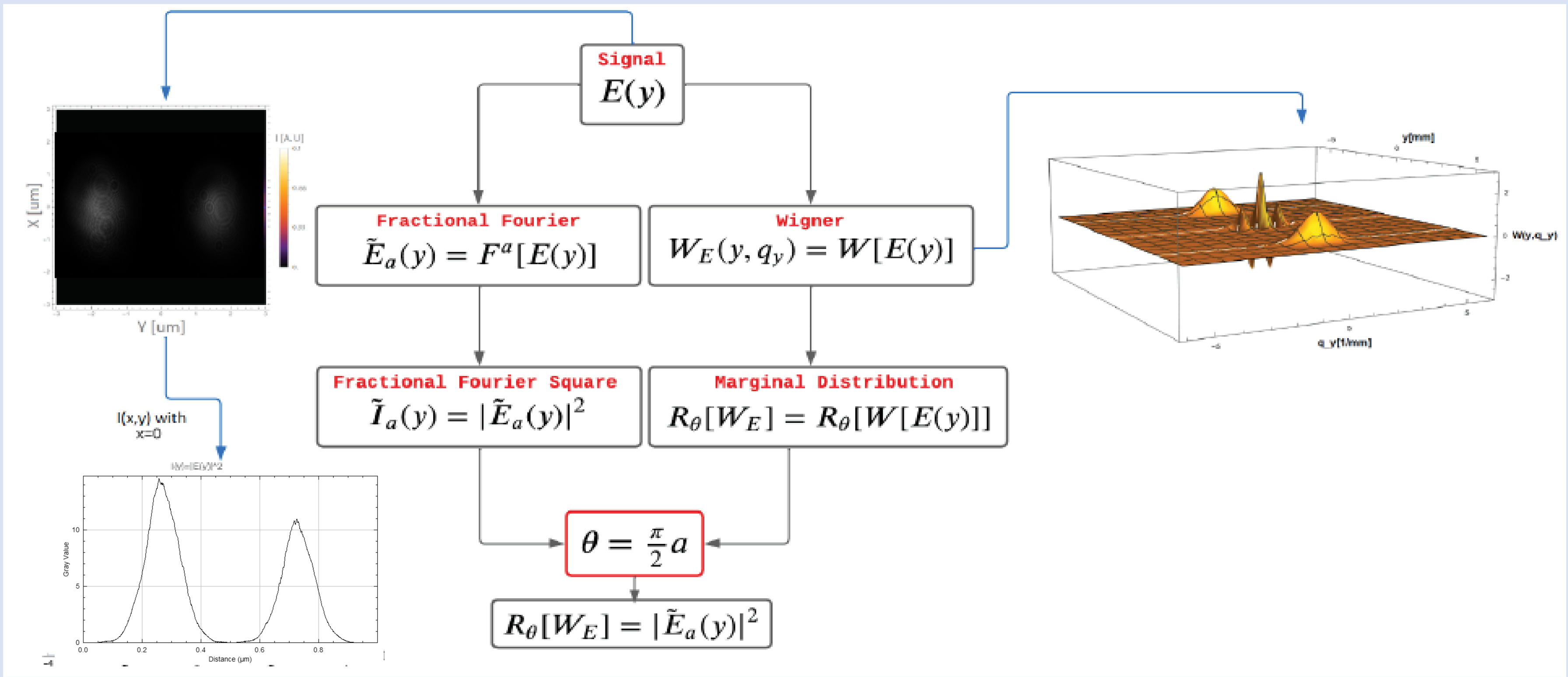
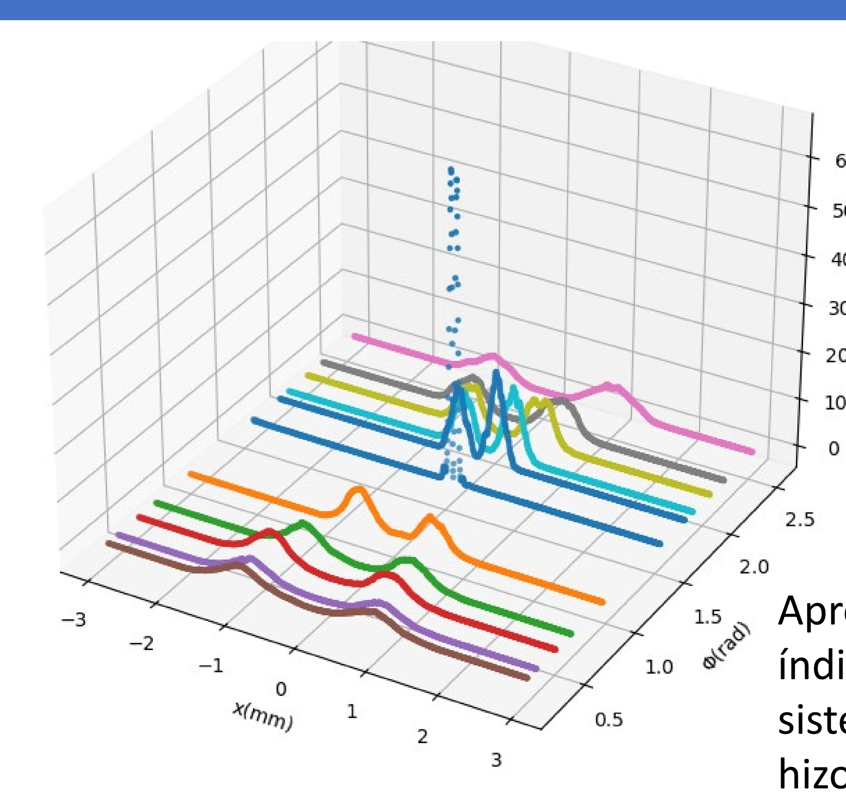


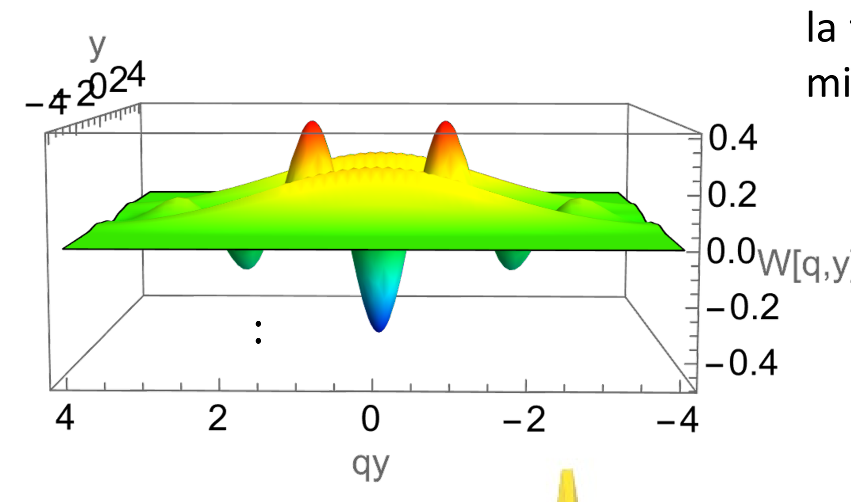
Figura 2. Esquema de medición de la funció de Wigner de un campo eléctrico especial compuesto de dos haces gaussianos separados una distancia 2d. Tomada de [1].

Resultados

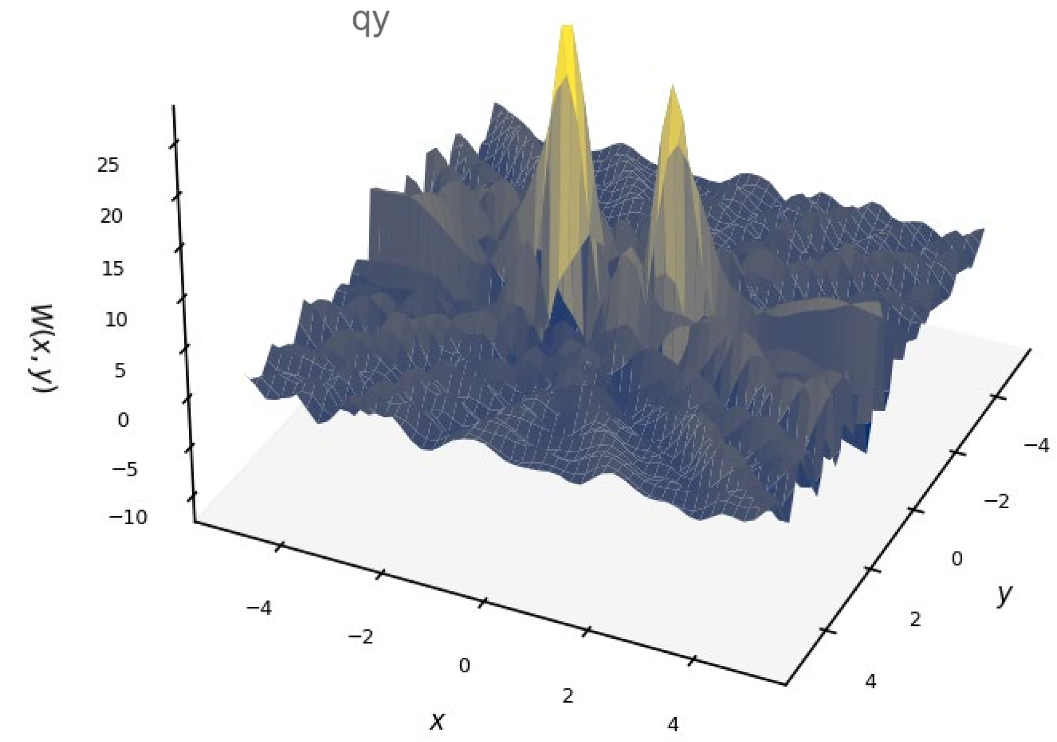


Mediciones FFT realizadas en el laboratorio. X es la variable conjugada de Θ, Θ es el ángulo de proyección de la distribución marginal y en el eje z se graficó el módulo cuadrado de la FFT.

Aprovechando el principio de aditividad del índice de la FFT, se implementó un segundo sistema 2z con un lente de distancia focal f´. Esto hizo posible realizar diferentes transformadas a la transformada de orden uno, de manera que se midieron transformaciones para θ>π/2.



Función de Wigner teórica para los parámetros de los haces gaussianos utilizados: α=4,88, d=1mm.



Función de Wigner obtenida experimentalmente

Conclusiones y trabajo a futuro

Se logró implementar un montaje óptico mediante el cual es posible medir las FFT del campo eléctrico unidimensional de dos haces gaussianos separados una distancia d=1mm.

Es posible tomar transformadas ϴ>π/2 teniendo en cuenta la propiedad de aditividad de la FFT, lo que permite medir más distribuciones marginales y reconstruir de mejor manera la función de Wigner.

Es necesario tomar más datos para que la función de Wigner reconstruida se ajuste de mejor manera al resultado teórico.

References

[1]. Pedro Enrique Piñeros Lourenco. Emulating the wigner function of an odd cat state by means of classical light fields. 2023.

[2]. Sebastián Menjura, Reconstruction of the Wigner function for a cat state using a classical Gaussian Beam. 2023