

# Modulación del Contenido Espacial de la Luz Utilizando un SLM

Borja Martinez Ramirez

December 5, 2024

## Resumen

Debido a sus muchas aplicaciones en optomecánica, astronomía, computación cuántica, y trampas atómicas, en este trabajo exploramos la generación de haces de orden alto con holografía digital. En concreto, se buscó generar haces Laguerre-Gauss por el momento rotacional intrínseco que tiene, y que lo hace ideal para la construcción de vórtices ópticos, además de dar otro grado de libertad para aplicaciones de computación cuántica. Para generar estos haces se utilizó la técnica de holografía SLM que consta en generar digitalmente una rejilla de difracción que posteriormente se proyecta en el modulador espacial de luz (SLM) en el que incide el haz original, generando una reflexión con el modo esperado. Para llevar esto a cabo en el arreglo se incluyó un divisor de haz que permite compartir el láser con otro experimento, un polarizador y una placa de media onda que en su conjunto permiten modular la polarización del haz incidente, y un iris que nos permite filtrar los ordenes que no sean de interés. La calidad de los modos generados no es la ideal, por lo que se plantea la adición un pinole además de la de un sistema telescópico para mejorar la calidad de estos modos generados. Además se propone continuar este trabajo generando haces Hermite-Gauss e Ince-Gauss, ya que se podría utilizar el mismo arreglo.

## 1 Introducción

Durante la década del 2000 el estudio de los haces de orden alto (como los Laguerre-Gauss), incrementó rápidamente debido a múltiples nuevas aplicaciones, en especial para la elaboración de trampas ópticas más sofisticadas que las existentes hasta ese momento. Los haces con modos Laguerre-Gauss se empezaron a estudiar tan solo un poco más tarde que otros haces de orden alto como los Hermite-Gauss, pues la mayor complejidad de sus estructuras hace que sean mucho más difíciles de generar, en particular en el caso de los modos con alto índice radial.

Para la manipulación de haces fríos son particularmente interesantes los elusivos haces Laguerre-Gauss con índice radial alto. Este tipo de haces presentan múltiples anillos, y su complejidad hace que sea difícil obtenerlos, por este motivo históricamente se han estudiado más extensivamente los modos con índice radial bajo. Pero su estudio no es imposible, múltiples métodos para la generación de estos haces han sido desarrollados en las últimas dos décadas. Para generar estos haces se requieren discontinuidades radiales rápidas en la posición exacta, y se puede utilizar un modulador espacial de luz (SLM) de forma que manipule la fase de la luz incidente con alta precisión y con un amplio ancho de banda espacial, permitiendo suficiente calidad como para generar estructuras tan complicadas como los haces Laguerre-Gauss con alto índice radial (Y. Ohtake, et al., 2007).

En concreto, los SLM pueden generar este tipo de modos al retrasar la fase del haz incidente en diferentes grados. Esto lo logran a través de un cristal líquido, cuyas moléculas bierefingentes son alineadas pixel a pixel por el voltaje que un electrodo les induce provoca que el índice de refracción del material aumente o disminuya a conveniencia, lo que a su vez provoca un aumento o disminución de retraso de fase en cada pixel del SLM.

## 2 Metodología

En este trabajo se presenta un método para generar haces Laguerre-Gauss a partir de holografía SLM. Este método se compone de tres etapas principales: generación por métodos computacionales de una rejilla de difracción digital, proyección de la rejilla en el SLM, y finalmente incidir el haz.

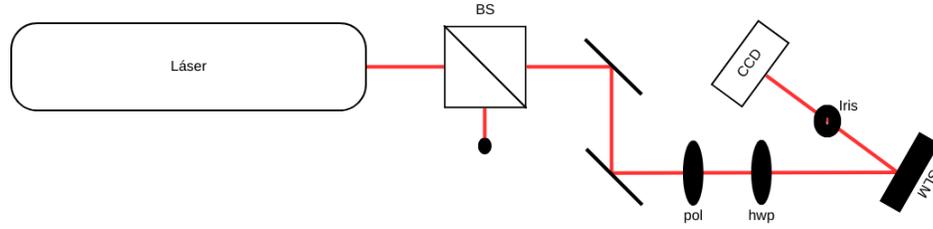


Figure 1: Arreglo utilizado

## 2.1 Generación de la rejilla

Para la generación de la rejilla de difracción digital, se diseñó un programa computacional cuyo funcionamiento se basa en los principios de la holografía tradicional. En primera instancia se simulan dos campos electromagnéticos, uno correspondiente a haz que incidirá con el SLM (el "haz de referencia") y otro correspondiente al modo que se desea generar ("haz objeto"). Posteriormente, se simula la interferencia entre estos campos en un plano vertical y con el ángulo correspondiente al que haya entre el SLM y el haz de referencia en el arreglo experimental. Al tomar el componente de fase de esta interferencia tendremos el equivalente digital a la rejilla de difracción generada por métodos de holografía tradicionales. Posteriormente, esta rejilla se proyecta en el SLM a través de un cable VGA, como si fuera un segundo monitor o proyector cualquiera.

## 2.2 SLM

El componente óptico más importante en un arreglo de holografía es evidentemente el que le da su nombre, el SLM. Para este trabajo se utilizó un SLM SDE 1024 de Cambridge Correlators con resolución de  $1024 \times 768$  pixeles en una pantalla de apenas  $9.3 \times 7$  mm y una reflectividad del 63% de 633 nm como el que se utilizó en este trabajo..

## 2.3 Arreglo Experimental

Tras seis iteraciones distintas, cada una con problemas distintos de cara a la generación de los modos Laguerre-Gauss, se llegó al arreglo de la figura . Este se compone de un divisor de haz que permite compartir el laser con otro experimento; un par de espejos de alineación; un polarizador y una placa de media onda que en su conjunto permiten modular la polarización del haz, pues para el buen funcionamiento del SLM, la orientación de la rejilla tiene que coincidir con la del haz; el SLM descrito en la sección anterior; un iris para filtrar los ordenes que no son de interés, además de disminuir el ruido en las mediciones; y una cámara CCD con la que se observaron los modos generados.

Entre las ideas propuestas pero finalmente descartas, destaca la colimación del haz con un sistema telescópico. La mayoría de la literatura propone arreglos con haces ya sea colimados desde el láser o posteriormente con un sistema telescópico, pero en este caso se encontró que el colimar el haz provocaba la desaparición completa de los modos, por lo que se decidió seguir trabajando con un haz divergente en la región del experimento.

## 3 Resultados y Discusión

Por este método se pudieron observar veinte modos con índice azimutal  $l$ , entre 0 y 5, y con índice radial  $p$  entre 0 y 3. Cuatro de estos modos generados se presentan en la figura .

Los modos obtenidos, incluso con índices bajos, no son de la calidad deseada, y su calidad empeora aún más al observar los modos con índices altos, pues la distribución de la luz en una mayor área provoca que empiecen a perderse entre el ruido. Como trabajo futuro, se podría mejorar la calidad de los modos en primera instancia limpiando el perfil espacial del haz antes de incidir con el SLM, utilizando un pinhole. Pero también podría ayudar el colimar el haz de forma adecuada e incluso caracterizarlo de una forma más precisa. También se podría utilizar un lente para facilitar la observación de los modos, pues con el arreglo actual tienen un diámetro de apenas unos pocos milímetros.

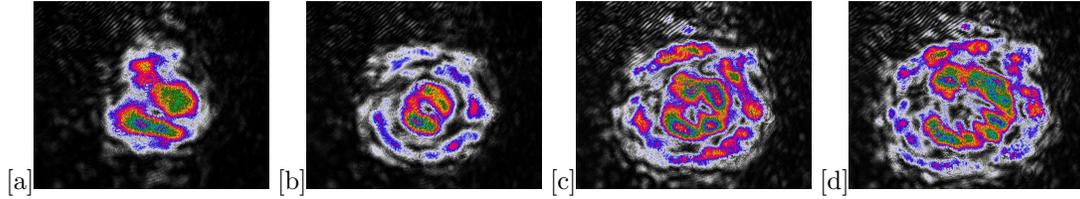


Figure 2: (a) Modo  $l = 1, p = 0$  (b) Modo  $l = 1, p = 1$  (c) Modo  $l = 2, p = 1$  (d) Modo  $l = 4, p = 1$

Se ha mostrado interés en utilizar los resultados de este trabajo para aplicaciones de computación cuántica, codificando información en el perfil espacial de modos que interfieren entre sí. También se podría utilizar este trabajo como un punto de partida para la construcción de trampas atómicas (en concreto vórtices ópticos), o incluso para la generación de otros haces de alto orden, como los Hermite-Gauss, o los Ince-Gauss, pues en principio lo único que se tendría que cambiar sería la rejilla de difracción digital.

## Referencias

- [1] G. Gouesbet. Dark and superdark theorems with applications to helical beams (beams with a topological charge) which are not vortex beams. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 318:108949, May 2024.
- [2] Y. Lian, X. Qi, Y. Wang, Z. Bai, Y. Wang, and Z. Lu. OAM beam generation in space and its applications: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 151:106923, Apr. 2022.
- [3] T. Liu, M. Tian, Q. Sheng, S. Fu, W. Shi, and J. Yao. Research on the intensity profiles of high-order Laguerre-Gaussian mode laser beams. *Infrared Physics & Technology*, 141:105459, Sept. 2024.
- [4] Y. Ohtake, T. Ando, N. Fukuchi, N. Matsumoto, H. Ito, and T. Hara. Universal generation of higher-order multiringed Laguerre-Gaussian beams by using a spatial light modulator. *Optics Letters*, 32(11):1411–1413, June 2007. Publisher: Optica Publishing Group.
- [5] F. Pampaloni and J. Enderlein. Gaussian, Hermite-Gaussian, and Laguerre-Gaussian beams: A primer. Nov. 2004.
- [6] J. Yu, X. Zhu, F. Wang, Y. Chen, and Y. Cai. Research progress on manipulating spatial coherence structure of light beam and its applications. *Progress in Quantum Electronics*, 91-92:100486, Nov. 2023.