

Reporte Final Laboratorio Avanzado: Acople y Medición en Óptica.

Jean C. Cortissoz y José R. Mejía.

I. RESUMEN

En este proyecto se realizó un montaje en el cual se acoplaron los grados de libertad de polarización y espaciales en un haz de luz, en particular de un láser. Como aplicación de este montaje se midieron las coherencias (elementos fuera de la diagonal) de la matriz de polarización del haz de luz obtenido luego de realizar el acople, mediante un TBD (Tunable Beam Displacer, también llamado L-shape) entre los grados de libertad mencionados de un estado preparado conocido, y se comparó con las predicciones hechas por la teoría.

II. OBJETIVOS

- Acoplar los grados de libertad de polarización y espacial de un haz de luz.
- Observar la evolución de las matrices de polarización del sistema, después de acoplar los dos grados de libertad y comparar con las predicciones teóricas.

III. MARCO TEÓRICO

A. Descripción de la luz

Un haz de luz, en particular el de un láser, puede ser descrito en términos de sus grados de libertad; en el caso del proyecto los relevantes son posición, frecuencia y polarización en donde los dos primeros son variables continuas y el último una variable discreta. En general estos grados de libertad se presentan como variables desacopladas, tal que cuando se hace la descripción a nivel cuántico el estado de la luz se escribe como un estado producto de la forma [4]

$$|\psi\rangle = |x\rangle \otimes |\omega\rangle \otimes |\alpha\rangle, \quad (1)$$

en donde x representa las variables de posición, ω las variables de frecuencia y α la polarización. Debido a la dualidad onda partícula de la luz se debe escoger en que régimen trabajar. En el caso del laboratorio desarrollado en donde se tiene luz de baja energía (infrarrojo) y de alta intensidad ($\sim 1mW$) se debe trabajar con la descripción ondulatoria en términos de campos eléctricos de la luz. A continuación se hará un énfasis en las variables de interés las cuales son la distribución espacial y la polarización.

1. Distribución espacial

Para describir un haz de luz que proviene de un láser es relevante trabajar con la ecuación de onda paraxial. En esta se tiene en cuenta que la onda se propaga en la dirección z con mayor amplitud que en las direcciones perpendiculares a esta. De la electrodinámica sabemos que el campo eléctrico para este tipo de ondas debe cumplir con la ecuación

$$(\nabla^2 + k^2)\tilde{E}(x, y, z) = 0.$$

Ya que se indica que la onda se propaga en la dirección z se puede escribir el vector de campo eléctrico como

$$\vec{E} = u(x, y, z)e^{-ikz},$$

en donde u indica la distribución transversal de la onda. El acople con fibra óptica que se realizó en el laboratorio funciona como un filtro espacial. En este caso el haz se modela como una distribución Gaussiana; por lo tanto, la función u toma la forma

$$u(x, y, z) = \frac{e^{-ik\frac{x^2+y^2}{2R(z)} - \frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}}}{q(z)},$$

en donde $R(z)$ es el radio de curvatura, ω es proporcional a la varianza de la Gaussiana y $q(z)$ es una función auxiliar que se interpreta como el radio de curvatura en el espacio complejo. De esta expresión se obtiene la fórmula para la intensidad

$$I(x, y, z) = |u(x, y, z)|^2 = \frac{e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega(z)^2}}}{|q(z)|^2},$$

donde se observa claramente la envolvente Gaussiana de la intensidad. Este modelo se corroboró viendo la distribución espacial de la intensidad del haz de luz, la cual se muestra en las figuras 1 y 2.

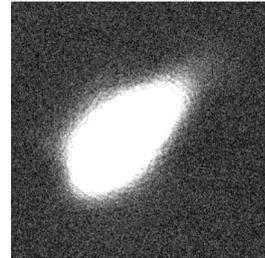


Figura 1: Imagen tomada con cámara CCD del haz de luz. Tomada de [1].

2. Polarización

De la teoría electromagnética se tiene que el campo eléctrico, a pesar de ser un campo en \mathbb{R}^3 , sólo puede



Figura 2: Perfil del haz en direcciones perpendiculares. Tomada de [1].

tomar dos orientaciones posibles. A estas orientaciones se les llama grados de polarización. Si se resuelven las ecuaciones de onda para las componentes del campo eléctrico en las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación (z) se puede obtener la relación

$$\frac{E_x^2(t)}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2(t)}{E_{0y}^2} - 2\frac{E_x(t)E_y(t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \Delta = \sin^2 \Delta, \quad (2)$$

donde $E_{\{x,y\}}(t)$ es el campo eléctrico en $\{x,y\}$, $E_{0,\{x,y\}}$ es la amplitud del campo en la dirección correspondiente y Δ es el desfase entre las componentes x y y . Los 6 estados de polarización degenerados se escriben en términos de estas variables de acuerdo a la tabla I.

$E_{0y} = 0$	$ H\rangle$
$E_{0x} = 0$	$ V\rangle$
$E_{0x} = E_{0y}; \Delta = 0$	$ D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle + V\rangle)$
$E_{0x} = E_{0y}; \Delta = \pi$	$ A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle - V\rangle)$
$E_{0x} = E_{0y}; \Delta = \pi/2$	$ R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle - i V\rangle)$
$E_{0x} = E_{0y}; \Delta = -\pi/2$	$ L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle + i V\rangle)$

Cuadro I: Parámetros correspondientes a los 6 estados de polarización

La ecuación (2) es una ecuación instantánea en el tiempo; por lo tanto, al tomar un promedio temporal y asumiendo la solución de ondas planas para los campos se obtiene

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2,$$

donde los S_i reciben el nombre de parámetros de Stokes y vienen dados por

$$\begin{aligned} S_0 &= E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \\ S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \\ S_2 &= 2E_{0x}E_{0y} \cos \Delta, \\ S_3 &= 2E_{0x}E_{0y} \sin \Delta. \end{aligned}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta la tabla I se pueden representar los estados degenerados por vectores en \mathbb{R}^4 de la forma $\vec{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)$; e.g., $|H\rangle = (1, 1, 0, 0)$, $|D\rangle = (1, 0, 1, 0)$, en donde se ha normalizado por la intensidad. Estos parámetros de Stokes dan una descripción completa de la polarización. Los parámetros de Stokes se midieron en el laboratorio de acuerdo a lo que se describe en el proceso experimental. De forma equivalente se puede describir a los elementos del laboratorio que cambian la polarización del haz como

transformaciones lineales sobre este vector de Stokes. Estas tienen el nombre de matrices de Müller y las que se usaron durante el laboratorio se escribirán a continuación.

$$\text{MHWP}(\theta_-) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(4\theta) & \sin(4\theta) & 0 \\ 0 & \sin(4\theta) & -\cos(4\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

esta representa la acción de una lámina de media onda rotada un ángulo θ con respecto al eje horizontal.

$$\text{MQWP}(\theta_-) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ 0 & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & -\cos(2\theta) \\ 0 & -\sin(2\theta) & \cos(2\theta) & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

la cual corresponde a la acción de una lámina de un cuarto de onda rotada un ángulo θ con respecto al eje horizontal.

$$\text{MPOLX} := \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

la cual corresponde a un polarizador en la dirección horizontal. Ya que la polarización es un sistema de 2 niveles se puede hacer una analogía con un sistema de espín. Por lo tanto, la matriz de polarización se puede escribir en términos de los parámetros de Stokes como

$$\rho = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 S_i \sigma_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S_0 + S_3 & S_2 + iS_1 \\ S_2 - iS_1 & S_0 - S_3 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

3. Acople entre variables espaciales y polarización

Como se describe en el montaje experimental la L-shape hace el trabajo de acoplar los grados de libertad de polarización y espaciales. Esto se ilustra en la imagen 3 en donde se ve que el aparato introduce una

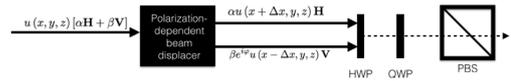


Figura 3: Esquema de el acople (tomado de [1]).

fase en principio desconocida. La intensidad registrada en la cámara CCD será la norma de la suma de los campos eléctricos que están desfasados una distancia d . Teniendo en cuenta la fase y que se tiene una distribución espacial Gaussiana es posible calcular los elementos no diagonales de la matriz de polarización: Las coherencias [1]. En particular para $|D\rangle$ se tiene:

$$\begin{aligned}\rho_{11} &= \frac{I_-}{2}, \\ \rho_{12} = \rho_{21} &= \frac{1}{2} I_+ I_- \exp \left[-\frac{d^2 \sigma_x^2}{2} + i(2q_{0x}d - \phi) \right], \\ \rho_{22} &= \frac{I_+}{2},\end{aligned}$$

en donde q_{0x} (media) y σ_x (desviación, ancho) caracterizan la distribución Gaussiana de momentos del haz de luz y ϕ es el ángulo. La componente ρ_{12} es la componente de interés para este trabajo. Se comparará posteriormente con los resultados experimentales.

IV. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para este montaje se necesitaron los siguientes aparatos:

- láser de 808 nm de longitud de onda (cuyas especificaciones son las siguientes: Thorlabs CPS 808, 9 mW, elliptical beam),
- cable de fibra óptica (que funciona como un filtro espacial),
- 2 láminas de cuarto de onda (QWP), 2 láminas de media onda (HWP),
- un polarizador, y un Polarizing Beam Splitter (PBS),
- 4 espejos (son útiles para alinear y modificar convenientemente el camino óptico: Se recomienda su uso en procesos de alineación),
- 6 iris (algunos de ellos se usan para realizar la alineación del camino óptico y otros para bloquearlo, esto último por razones de seguridad),
- un Tunable Beam Displacer (TBD), también conocido como L-shape (sus elementos constitutivos se describen más abajo),
- cámara CCD.

El TBD o L-shape a su vez consta de las siguientes partes:

- una base rotativa para su montaje,
- Un Polarizing Beam Splitter (PBS),
- 2 espejos.

Para efectuar rotaciones pequeñas (del orden de $0,02^\circ$), el TBD cuenta con un sistema de motores, el cual se maneja a través de software especializado.

A. Módulo de emisión

Este consta del láser, dos espejos para facilitar la alineación y la fibra óptica, la cual funciona como un filtro espacial para garantizar que el haz que se usará para efectuar las mediciones sea Gaussiano. El módulo se considera listo, al menos en este experimento, cuando el haz que sale por la fibra óptica tiene aproximadamente un 10% de la intensidad del haz emitido por el láser. Por motivos de seguridad se coloca un iris frente al láser, y uno frente al punto de salida del haz por la fibra óptica.

B. Módulo de preparación de estados

Este módulo consiste en montar, siguiendo la dirección del camino óptico del haz de luz que emerge del módulo de emisión, el polarizador, luego la HWP y finalmente la QWP.

Para calibrar el módulo de preparación se rota el polarizador hasta el punto donde este deja pasar el haz de mayor intensidad. Para poder definir el estado de polarización horizontal realizamos el siguiente procedimiento: Primero se coloca frente al polarizador un PBS; luego se coloca una de las dos láminas de onda (cualquiera, pues luego se realizará este mismo procedimiento con la otra), entre el PBS y el polarizador y, rotando dicha lámina, se encuentra el punto en el que el rayo que incide en el PBS pasa con la mayor intensidad (es decir, no hay parte del haz incidente que sea reflejada). Los ángulos de rotación de las láminas de onda así obtenidos se fijan como el ángulo de rotación 0° . Una vez realizado este procedimiento, se procede a hacer el montaje como se indica en el párrafo anterior. El haz de luz que pasa por este dispositivo, con esta calibración, se define como el estado de polarización horizontal ($|H\rangle$).

Usando esta convención, bajo ciertas rotaciones de las láminas de polarización se pueden preparar los diferentes estados de polarización que se utilizaron en este experimento. En particular tenemos:

Ángulo HWP	Ángulo QWP	Estado Preparado
0	0	$ H\rangle$
0	$\frac{\pi}{4}$	$ V\rangle$
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{8}$	$ D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle + V\rangle)$
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{8}$	$ A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle - V\rangle)$
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$ R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle - i V\rangle)$
$\frac{\pi}{4}$	0	$ L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle + i V\rangle)$

Cuadro II: Ángulos de rotación de las láminas de onda (en radianes) para la preparación de los seis estados degenerados.

C. Módulo de medición

Se situaron en el siguiente orden, siguiendo la dirección del haz de luz, la QWP, la HWP, el PBS y al final la cámara CCD (que nos permite medir intensidad por píxel del haz de luz incidente). Con este módulo se pueden medir los parámetros de Stokes del haz preparado rotando de manera conveniente las láminas de onda.

Para calibrar este módulo se procede de manera similar a como se hizo con el módulo de preparación. Procedemos entonces de la siguiente manera: Se prepara un estado de polarización horizontal y se coloca una sola lámina de onda entre el haz preparado y el PBS que hace parte del módulo de medición. Se rota entonces dicha lámina, hasta encontrar que por el PBS del módulo de medición pasa el haz de mayor intensidad (no hay haz reflejado). Luego se realiza este mismo procedimiento con la segunda lámina. Se procede a hacer el montaje como se describe en el párrafo anterior. Dispuesto de esta manera, convenimos que el ángulo de rotación de ambas láminas es 0° .

Para medir los parámetros de Stokes procedemos a hacer la medición de la intensidad del haz de luz que finalmente incide en la cámara CCD, bajo ciertas rotaciones de las láminas de onda:

Ángulo HWP	Ángulo QWP	Parámetro de intensidad
0	0	a
0	$\frac{\pi}{4}$	b
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	c
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{8}$	d

Cuadro III: Ángulos de rotación de las láminas de onda (en radianes) para la medición de los parámetros de Stokes.

A partir de a, b, c, d se pueden calcular los parámetros de Stokes mediante el siguiente conjunto de fórmulas:

$$\begin{aligned} S_0 &= a + b, & S_1 &= a - b \\ S_2 &= 2d - a - b, & S_3 &= a + b - 2c. \end{aligned}$$

D. Módulo de Acople: Tunable Beam Displacer (TBD) o L-shape

Dos espejos se colocan de manera equidistante de un polarizing beam splitter (PBS) formando una figura en forma de L , en cuyo vértice está el PBS (esto sobre una plataforma giratoria). Como es bien conocido, el PBS deja pasar haces de cierta polarización (que en nuestra nomenclatura denominamos horizontal: $|H\rangle$) mientras que refleja aquellos de otro tipo de polarización (que en nuestra nomenclatura denominamos vertical: $|V\rangle$). A la configuración descrita la denominaremos Tunable Beam Displacer (TBD). El TBD permite controlar la separación de los haces mediante el control del ángulo θ que sea rotada la configuración con respecto al haz incidente. Esto se ilustra en la figura 4 que ha sido tomada de [2].

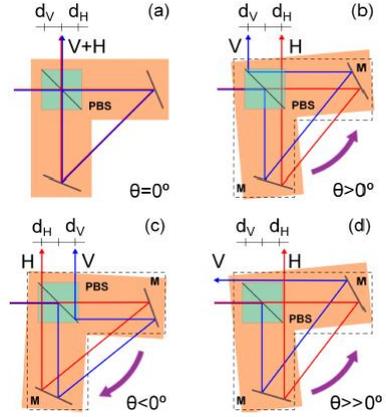


Figura 4: d_h y d_v denotan los desplazamientos de los haces emergentes, con polarización $|H\rangle$ y $|V\rangle$ respectivamente, con referencia a la posición cuando sólo se ve un rayo emergente y que corresponde a $\theta = 0^\circ$. En (a) se muestra la situación para $\theta = 0^\circ$. En (b) y (c) se muestran diferentes posibles resultados para d_h, d_v , mientras que (d) muestra una posición para la cual d_v no está definida. La línea punteada muestra el caso de referencia $\theta = 0^\circ$ (Tomada de [2]).

El proceso de calibración se lleva a cabo de la siguiente manera: Una vez se han instalado los elementos de la L-shape, se rota su base hasta que de ella sólo emerja un haz; a esta posición la tomamos como el ángulo de rotación de 0° de la L-shape.

Debemos también hacer una observación importante: La L-shape introduce una diferencia de fase entre las componentes $|H\rangle$ y $|V\rangle$ del haz incidente. Empíricamente encontramos la siguiente relación:

$$\alpha |H\rangle + \beta |V\rangle \xrightarrow{\text{L-shape}} \alpha |H\rangle + e^{i\frac{\pi}{2}} \beta |V\rangle.$$

Aunque este fenómeno no parece estar documentado, se puede ver que guarda mucha relación con lo que sucede en un interferómetro de Sagnac [3].

E. Montaje Final

Una vez se han preparado los diferentes módulos descritos, estos se colocan en el siguiente orden siguiendo la dirección del camino óptico del haz de luz que se va a estudiar: Módulo de preparación, L-shape, Módulo de Medición (ver figura 5).

V. PROCESO EXPERIMENTAL

Se prepararon los seis estados de polarización. Una vez preparados dichos estados, estos se hacen pasar por el TBD (L-shape), la cual ha sido rotada y se mantiene fija en dicha posición para medir los parámetros de Stokes. Se realizaron mediciones para ángulos de rotación del TBD de entre $0,0375^\circ$ y 3° con un paso de $0,01875^\circ$. Para cada haz preparado y para cada ángulo se midieron los cuatro parámetros de Stokes. Esto

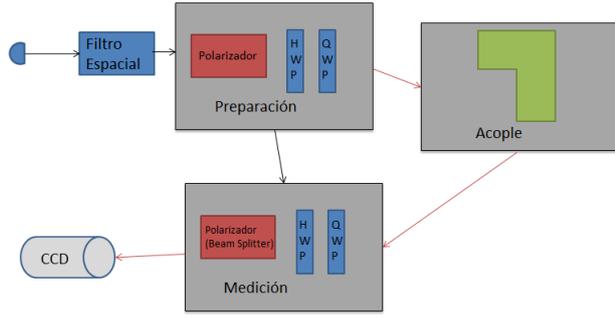


Figura 5: Esquema del montaje experimental.

último se hizo midiendo la intensidad (por píxel) del rayo incidente en la cámara CCD para las diferentes configuraciones (ángulos de rotación de las láminas de onda) del módulo de medición, como se explicó en la sección IV C.

Para medir un estado total de polarización una vez calculados los parámetros de Stokes de cada píxel de la cámara, estos se suman (se “integra” la imagen) y dicha suma se normaliza (de modo que el S_0 “integrado” fuese igual a 1). Es decir, si queremos calcular el parámetro de Stokes S_j total, sumamos el valor del parámetro S_j de cada píxel, y luego se divide entre el valor así obtenido para S_0 (note entonces que el valor de S_0 “integrado” es 1).

De esta manera una vez capturados los datos, se puede asociar la matriz de polarización al haz incidente en la cámara CCD y se puede asociar a cada ángulo de rotación del TBD, el cual produce un acople entre los estados de polarización y de posición del haz de luz preparado, el valor de las coherencias de la matriz de densidad.

VI. RESULTADOS

Después de la preparación de los estados degenerados se hizo una medición para comprobar la precisión de la preparación. Se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla mostrada en la Figura 6.

A $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\beta = -\frac{1}{\sqrt{2}}$	$a = 0.25\text{mW}$ $b = 0.17\text{mW}$ $c = 0.25\text{mW}$ $d = 0.01\text{mW}$	$S_0 = 1.00$ $S_1 = -0.09$ $S_2 = -0.05$ $S_3 = -0.80$	
R $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$	$a = 0.24\text{mW}$ $b = 0.19\text{mW}$ $c = 0.01\text{mW}$ $d = 0.20\text{mW}$	$S_0 = 1.02$ $S_1 = 0.12$ $S_2 = -0.02$ $S_3 = 0.97$	
L $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\beta = -\frac{1}{\sqrt{2}}$	$a = 0.19\text{mW}$ $b = 0.23\text{mW}$ $c = 0.42\text{mW}$ $d = 0.21\text{mW}$	$S_0 = 1.00$ $S_1 = -0.10$ $S_2 = 0$ $S_3 = -1.00$	
H $\alpha = 1$ $\beta = 0$	$a = 0.42\text{mW}$ $b = 0.01\text{mW}$ $c = 0.16\text{mW}$ $d = 0.26\text{mW}$	$S_0 = 1.00$ $S_1 = 0.95$ $S_2 = 0.21$ $S_3 = 0.25$	
V $\alpha = 0$ $\beta = 1$	$a = 0.01\text{mW}$ $b = 0.42\text{mW}$ $c = 0.27\text{mW}$ $d = 0.16\text{mW}$	$S_0 = 1.02$ $S_1 = 0.12$ $S_2 = -0.02$ $S_3 = 0.97$	
D $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}$	$a = 0.14\text{mW}$ $b = 0.29\text{mW}$ $c = 0.22\text{mW}$ $d = 0.40\text{mW}$	$S_0 = 1.04$ $S_1 = -0.36$ $S_2 = 0.89$ $S_3 = -0.04$	

Figura 6: Resultado de medición de estados preparados (en la primera columna aparece el estado preparado). Datos tomados en conjunto con J. R. Álvarez. Tabulación tomada de [1].

En este caso α y β son tales que el estado se escribe como $\alpha |H\rangle + \beta |V\rangle$. Los gráficos en la columna de la derecha muestran la matriz de polarización, en este caso la parte real e imaginaria respectivamente.

En la Figuras 7 y 8, mostramos los perfiles obtenidos para un haz de luz en estado de polarización $|D\rangle$, y el efecto que produce el rotar la L-shape en la separación en las componentes de polarización $|H\rangle$ y $|V\rangle$.

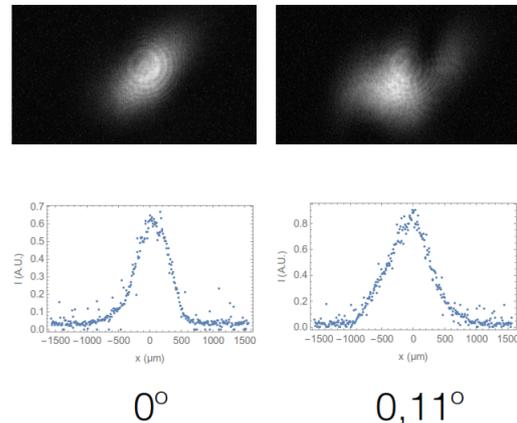


Figura 7: Perfiles de separación (suministrados por J. R. Álvarez).

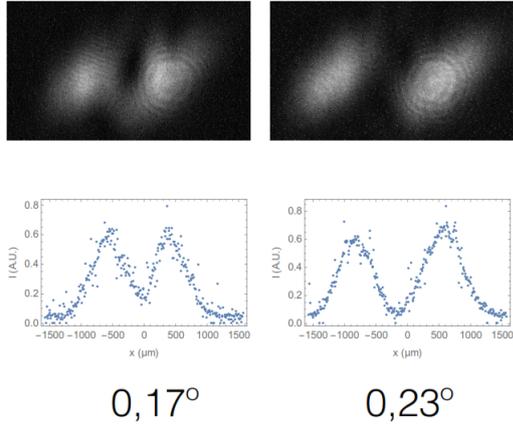


Figura 8: Perfiles de separación (suministrados por J. R. Álvarez).

En cuanto a las coherencias de la matriz de polarización, luego de hacer el acople, los resultados obtenidos en el caso del estado de polarización $|D\rangle$ (es decir el estado preparado es $|D\rangle$), son los presentados en la Figura 9 (obtenida en trabajo conjunto con J. R. Álvarez [1]).

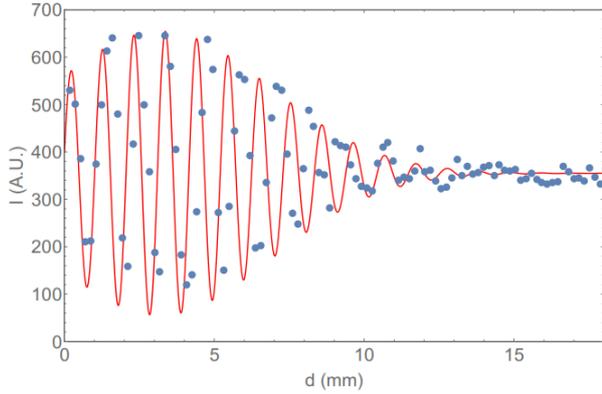


Figura 9: Resultados experimentales vs ajuste dado por la teoría (línea sólida).

Para el análisis que sigue debe tenerse en cuenta que el haz preparado está en el estado de polarización $|D\rangle$. En la Figura 9 se observan las mediciones obtenidas para la parte real del elemento ρ_{12} de la matriz de polarización. La curva sólida ha sido ajustada a partir de la fórmula teórica para ρ_{12} (en este caso la parte real de este número) presentada en la sección III A 3. La ecuación obtenida es

$$Re(f(d)) = I_0 + A \exp\left[-\frac{(d-d_0)^2\sigma^2}{2}\right] \times \cos[2q_{0x}(d-d_0) + \varphi]$$

con

$$I_0 = 355; \sigma = 0,04; q_{0x} = 3; d_0 = 3,2; \varphi = 1.$$

Estos parámetros de ajuste, que están en unidades arbitrarias, se encontraron usando el software *Mathema-*

tica (función *FindFit*), y donde $d = 5,9(mm) \times \theta$. Nótese la concordancia entre los datos experimentales y la curva teórica (la fórmula teórica se deduce a partir de ciertos supuestos para simplificar los cálculos, por eso en la curva de ajuste hay que desplazar dichos parámetros).

Por otro lado el hecho de que $\rho_{12} \rightarrow 0$ es de esperarse a medida que θ aumenta. En efecto, para θ suficientemente grande se observa una separación total entre la parte vertical y horizontal que componen el haz de luz incidente, y al tomar la traza sobre la variable espacial, debe obtenerse una matriz de polarización diagonal (recuerde que el estado preparado es $|D\rangle$), es decir, las coherencias deben ser 0.

Se puede hacer una analogía, un poco ingenua (ya que lo que se midió y reportó es física clásica), con sistemas cuánticos abiertos donde los grados de polarización son los grados de interés y el baño (ambiente) es el grado de libertad espacial, donde estos resultados muestran como varían las coherencias del sistema dependiendo del nivel de acople entre el baño y el sistema.

VII. CONCLUSIONES

- La fibra óptica proporciona un medio conveniente para producir haces Gaussianos.
- Se logró acoplar las variables de polarización y espacial, y medir el efecto de este acople, variando el grado de dicho acople mediante el uso de la L-shape, y utilizando como medida el valor de las coherencias de la matriz de polarización (para el estado $|D\rangle$).
- Encontramos experimentalmente que la L-shape introduce una fase entre las componentes vertical y horizontal del haz incidente. La fase encontrada es de $e^{i\frac{\pi}{2}}$. Este hecho no estaba contemplado en la literatura referente a este instrumento.
- Encontramos un buen ajuste entre los datos experimentales y lo que predice la teoría.
- El experimento y análisis realizados se pueden extender al universo cuántico realizándolos con fotones individuales.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este reporte quieren agradecer la colaboración de Juan Rafael Álvarez, con quien se realizó este montaje experimental, la toma y procesamiento de datos, es decir, por ser parte integral de este trabajo. También queremos agradecer a la profesora Alejandra Valencia por introducirnos al tema y darnos la idea de hacer este experimento. Finalmente, queremos en especial agradecer a David Guzmán: Su experticia técnica y conocimientos sobre el tema fueron invaluable para la realización de este trabajo.

-
- [1] J. R. Álvarez, *Coupling the spatial and polarization degrees of freedom of light: Applications in measurement theory and open quantum systems*.
- [2] L. J. Salazar-Serrano, A. Valencia, and J. P. Torres, ArXiv e-prints (2014), 1405.4760.
- [3] B. Culshaw, *Measurement Science and Technology* **17**, R1 (2006), URL <http://stacks.iop.org/0957-0233/17/i=1/a=R01>.
- [4] Nótese que esta descripción es simbólica ya que la luz se describe por medio de operadores de creación y destrucción de fotones.