

# MEMORIA DE PRÁCTICAS

RUIZ MENDOZA, JULIO DAVID 23958366W  
GRADO EN FÍSICA | ÓPTICA II 2020/2021

18 de enero de 2021

# ÍNDICE

<b>0. Práctica 0: Fotografía de fenómenos ópticos</b>	<b>3</b>
0.1. Ley de Snell . . . . .	3
0.2. Trayectoria de la luz en un medio con índice de refracción no constante. . . . .	4
0.3. Dispersión. Simulación de una atmósfera. . . . .	4
<b>1. Práctica I: Polarización y ecuaciones de Fresnel</b>	<b>6</b>
1.1. Ecuaciones de Fresnel . . . . .	6
1.2. Brewster . . . . .	8
1.3. Ley de Malus . . . . .	8
1.4. Materiales birrefringentes . . . . .	10
1.5. Vector de Stokes . . . . .	13
<b>2. Práctica II: Interferencias</b>	<b>14</b>
2.1. Experimento doble rendija de Young . . . . .	14
2.2. Interferómetro de Michelson . . . . .	19
<b>3. PRACTICA III: Difracción</b>	<b>21</b>
3.1. Difracción de Fraunhofer . . . . .	21
3.2. Red de difracción . . . . .	23
3.3. Longitud de onda de rayas espectrales . . . . .	25
<b>4. Conclusión</b>	<b>29</b>

# Introducción

En este informe vamos a analizar los datos tomados en todas prácticas realizadas a lo largo del curso en las que se observan diferentes fenómenos de óptica ondulatoria estudiados en las clases teóricas. Vamos a ver si podemos verificar las teorías establecidas hasta el momento o si por el contrario no se ajustan a las medidas experimentales.

## 0. PRÁCTICA 0: FOTOGRAFÍA DE FENÓMENOS ÓPTICOS

En esta sección vamos a comentar algunas fotos que he tomado con tres experimentos caseros fáciles de realizar en los que solo se necesita un recipiente con la forma adecuada (de preferencia cúbica), un medio con índice de refracción distinto al aire (en nuestro caso hemos utilizado agua y le hemos añadido un poco de leche para que se vea la trayectoria de la luz por la dispersión), un puntero láser y una linterna.

### 0.1. LEY DE SNELL

Lo que esta nos dice es que cuando la luz cambia de un medio con índice de refracción  $n$  a otro con  $n'$  con una interfase plana cambiará su ángulo con la normal según:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$

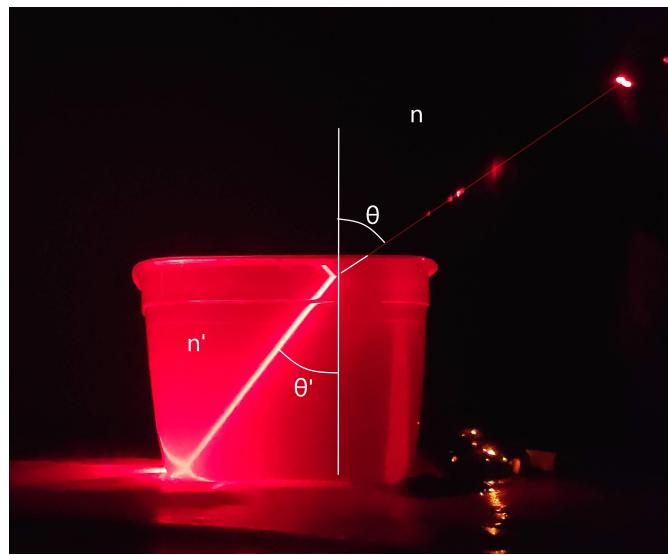


Figura 1: Experimento Ley de Snell

Vemos claramente como cambia la trayectoria del rayo cuando pasa del aire al agua, doblándose el rayo hacia el medio con mayor índice de refracción. Para poder ver mejor la trayectoria del rayo en el aire hemos quemado un papel con precaución para que cuando la luz atraviese el humo sea visible.

## 0.2. TRAYECTORIA DE LA LUZ EN UN MEDIO CON ÍNDICE DE REFRACCIÓN NO CONSTANTE.

Este experimento es similar al anterior, pero lo haremos con un medio en el que  $n$  depende de la profundidad, por lo que tendremos muchas capas en las que se aplica la ley de Snell. Para conseguir esto hemos añadido azúcar para crear una disolución saturada en el fondo mientras que en capas mas altas del recipiente habrá menos concentración, creando así una función de  $n$ .

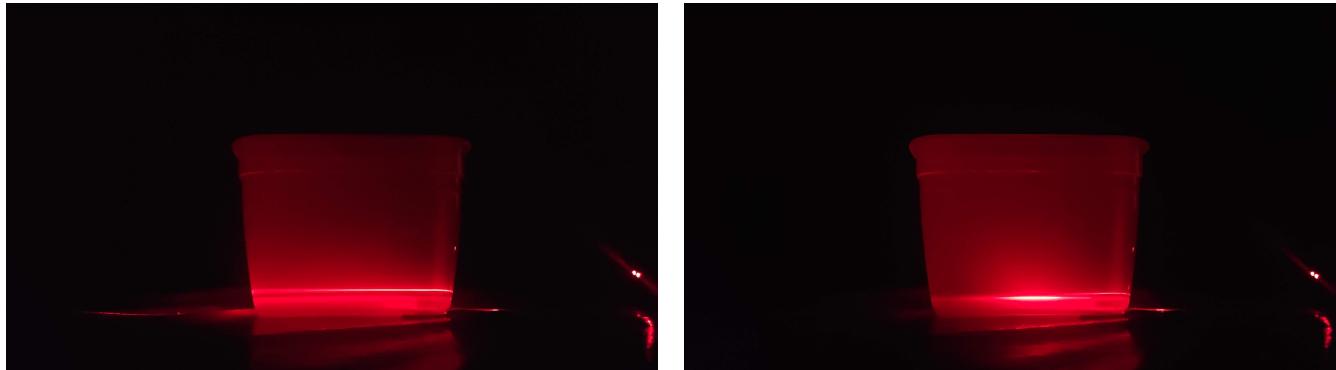


Figura 2: Trayectoria del rayo

Adjunto el link del vídeo ya que es mucho más visual y de primera mano resulta impresionante ver como se curva el rayo: <https://youtu.be/EXPC2bXrdH8>

## 0.3. DISPERSIÓN. SIMULACIÓN DE UNA ATMÓSFERA.

En este experimento veremos luz blanca a través de un medio dispersivo, usaremos una linterna y un recipiente con agua y leche.

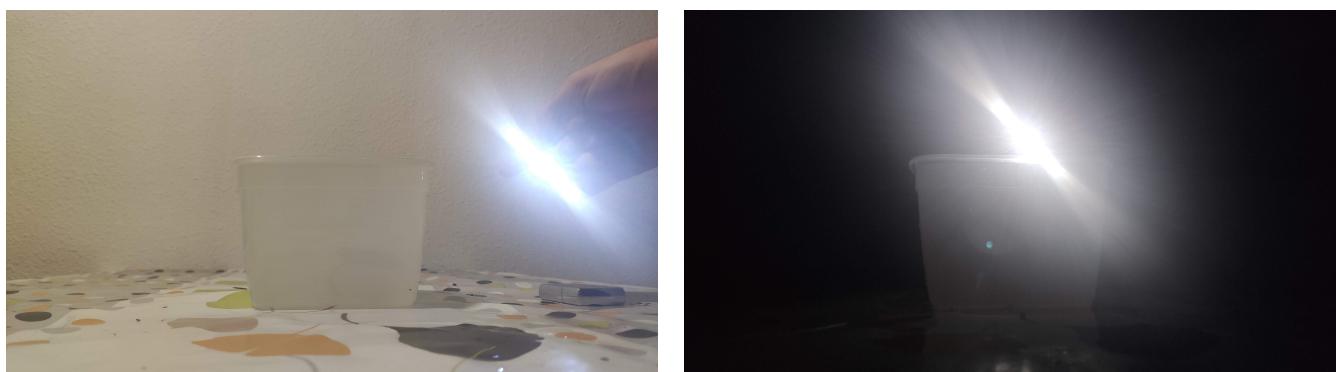




Figura 4: Simulación atmósfera

Lo que ocurre es que la luz blanca está formada por una mezcla de ondas con distintas longitudes de onda del espectro visible y al atravesar este medio las longitudes de onda más cortas tendrán más facilidad para dispersarse. Por esto es que el recipiente se ve en un tono azulado mientras que la linterna pasa a ser de un color anaranjado recordando a un atardecer. En la segunda imagen se asemeja a ver el cielo desde la luna o el espacio. Dejo otro vídeo para una mejor visualización. <https://youtu.be/XEmMHJNJuoc>

# 1. PRÁCTICA I: POLARIZACIÓN Y ECUACIONES DE FRESNEL

## 1.1. ECUACIONES DE FRESNEL

Medid y representad gráficamente la intensidad de la luz reflejada en un vidrio en función del ángulo de incidencia para luz polarizada vibrando paralela y perpendicular al plano de incidencia. Comparad las medidas experimentales con las predichas por las ecuaciones de Fresnel.

El primer experimento se compone de un puntero láser, un polarizador lineal, un prisma y un medidor de intensidades de la siguiente manera:

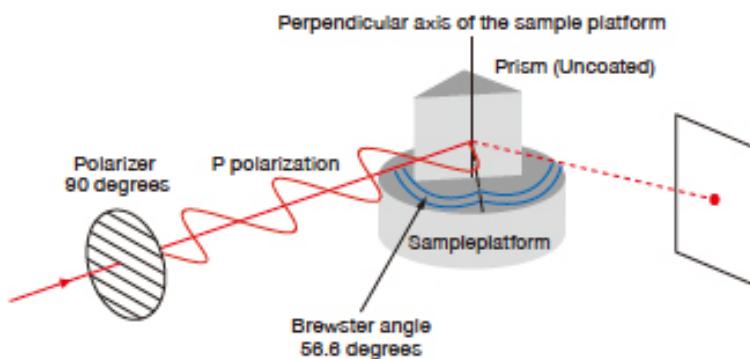


Figura 5: Montaje experimental

El polarizador lo orientaremos de forma que la luz vibre paralela o perpendicular al plano de incidencia e iremos rotando el prisma de modo que para cada ángulo mediremos una intensidad.

Luz vibrando perpendicularmente:

$\theta(^{\circ})$	5	10	20	30	40	50	60	70	75
I (Lux)	3	4	6	5	9	10	17	25	31

Luz paralela

$\theta(^{\circ})$	5	10	20	30	40	45	47	49	50	52	55	60	70	75
I (Lux)	10	7	6	6	4	1	1	0	0	0	0	1	5	21

Sabiendo que  $I_o = 196$  (intensidad captada del láser) y el índice de refracción del prisma (calculado en el siguiente apartado) es  $n' = 1.257$ , en teoría la intensidad reflejada por el prisma

de la luz perpendicular y la paralela se ajustan a la siguientes ecuaciones, respectivamente:<sup>1</sup>

$$I_{\perp}^R = I_o \frac{\sin^2(\theta' - \theta)}{\sin^2(\theta' + \theta)} \quad I_{\parallel}^R = I_o \frac{\tan^2(\theta' - \theta)}{\tan^2(\theta' + \theta)}$$

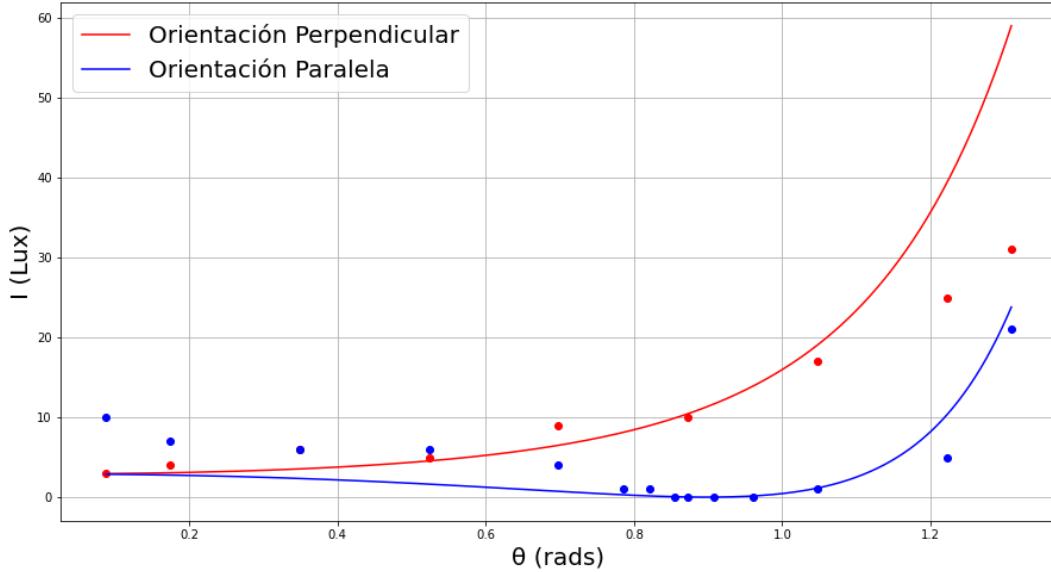


Figura 6: Representación gráfica

Aunque los datos no ajustan a la perfección vemos la tendencia a la curva, lo cual se puede deber a la luz de fondo en el laboratorio y a que los instrumentos del experimento no son perfectos. Lo importante es ver que los datos de la vibración perpendicular ascienden en la gráfica y en el caso paralelo se observa un mínimo y después vuelve a ascender.

<sup>1</sup> $\theta'$  se calcula mediante la ley de Snell.

## 1.2. BREWSTER

A partir de las medidas realizadas en (3.1) para el caso de luz paralela, determinad el ángulo de Brewster y de ahí estimad el índice de refracción del vidrio utilizado.

Según las medidas tomadas el ángulo de Brewster es de  $51.5^{\circ}$ . Para calcular el índice de refracción del prisma  $n'$ , sabiendo que  $n$  de aire es  $n = 1$ , usaremos:

$$\tan(\theta_B) = \frac{n'}{n} \implies n' = n \cdot \tan(\theta_B) = 1.257$$

## 1.3. LEY DE MALUS

Representad la intensidad transmitida por dos polarizadores lineales en función del ángulo relativo de sus ejes.

Este experimento trata de medir la intensidad de la luz de un puntero láser que pasa a través de dos polarizadores lineales según la orientación de sus ejes. Uno de ellos permanecerá constante y el otro lo iremos variando desde  $-90^{\circ}$  hasta  $90^{\circ}$ .

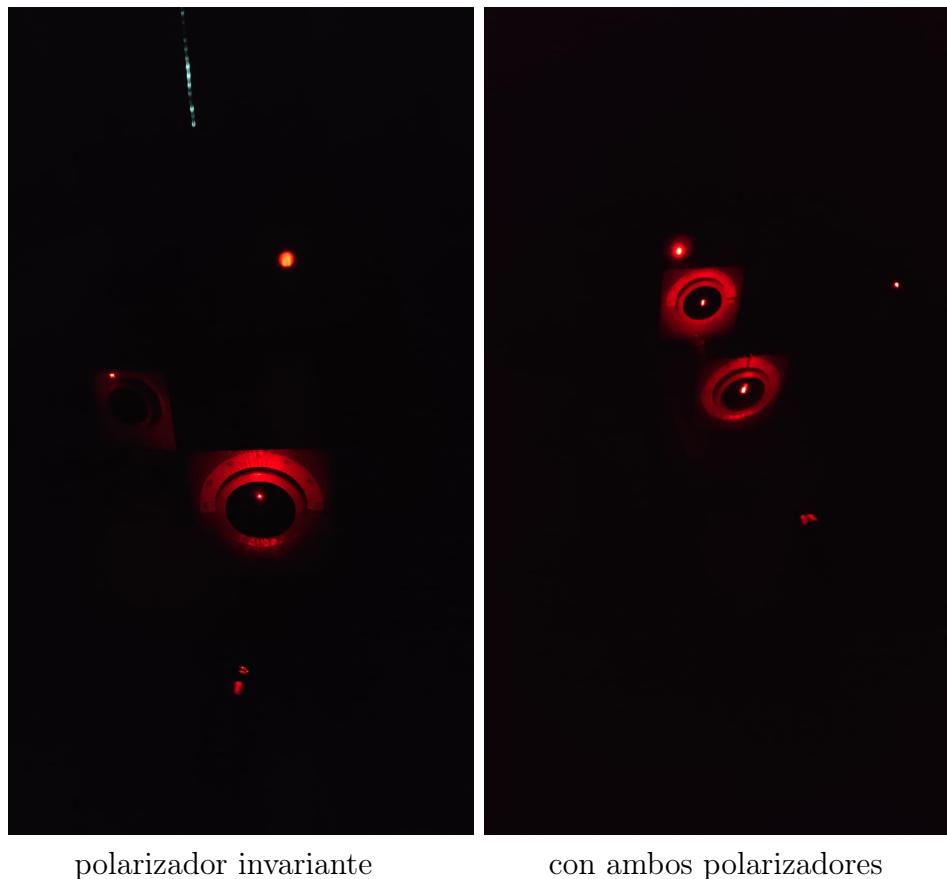


Figura 7: Montaje experimental Ley de Malus

La intensidad medida para cada ángulo es la siguiente:

$\theta(^{\circ})$	-90	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35
I (Lux)	3	0	2	7	16	34	50	84	125	163	201	241

$\theta(^{\circ})$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
I (Lux)	279	318	345	377	405	390	419	416	415	422	403	385

$\theta(^{\circ})$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
I (Lux)	350	336	296	259	229	195	145	115	85	63	37	19	6

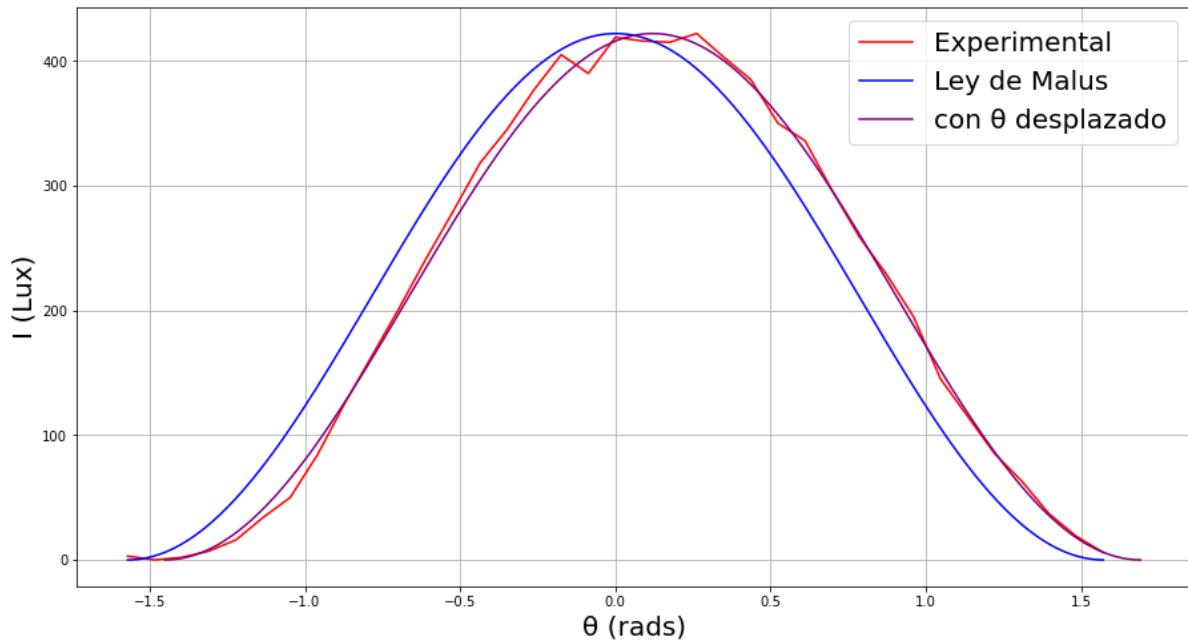


Figura 8: Representación gráfica

Obviamente cuando los polarizadores tienen sus ejes paralelos la intensidad es máxima, mientras que se anula cuando son perpendiculares. Además, las medidas se ajustan correctamente a la Ley de Malus la cual indica que la intensidad de luz que atraviesa dos polarizadores lineales depende del ángulo relativo entre ellos de la siguiente manera:

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$

Cabe destacar que para nuestras medidas el ángulo está desplazado unos  $6^{\circ}$ , esto puede ser a que el polarizador que permanece invariante no estuviese bien calibrado.

## 1.4. MATERIALES BIRREFRINGENTES

Expandid el haz y colocar los polarizadores lineales cruzados. Insertar distintos materiales con propiedades birrefringentes entre los polarizadores y referir los fenómenos. Tomad fotografías de los mismos.

Con los materiales del apartado anterior, dejaremos el ángulo relativo de los polarizadores de manera que la luz que vemos en la pared sea nula. Lo que haremos a continuación es introducir un objeto que tenga las propiedades necesarias para que sí llegue algo de luz al atravesar todo el sistema.

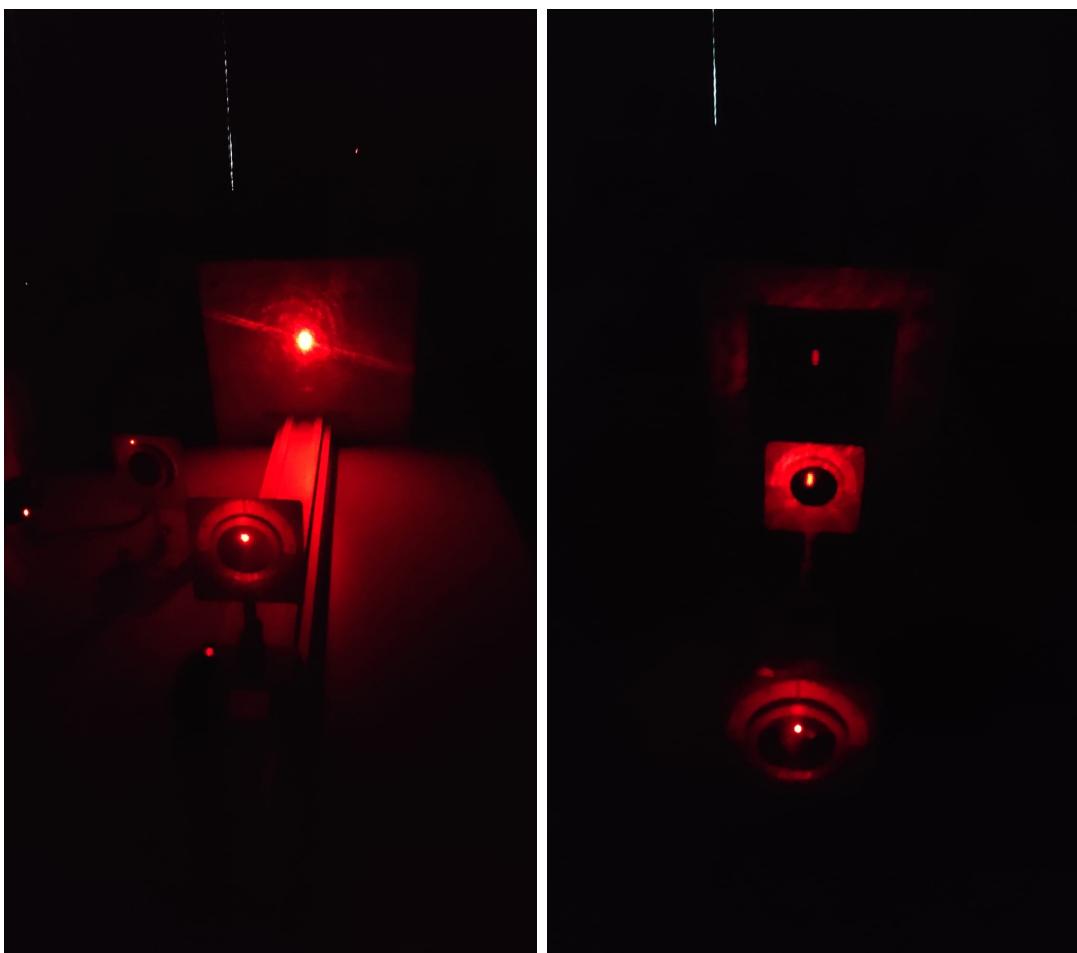


Figura 9: Montaje inicial



Figura 10: Girando una funda de plástico

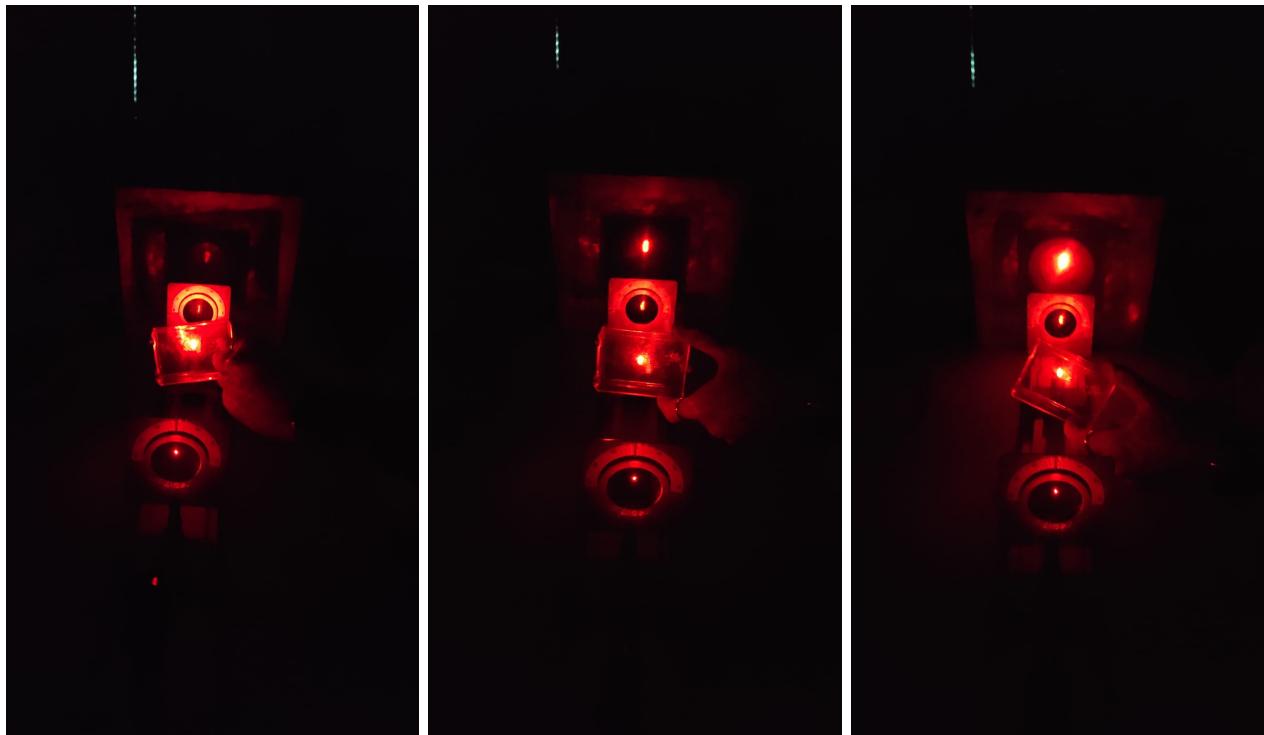


Figura 11: Girando la carcasa de un CD

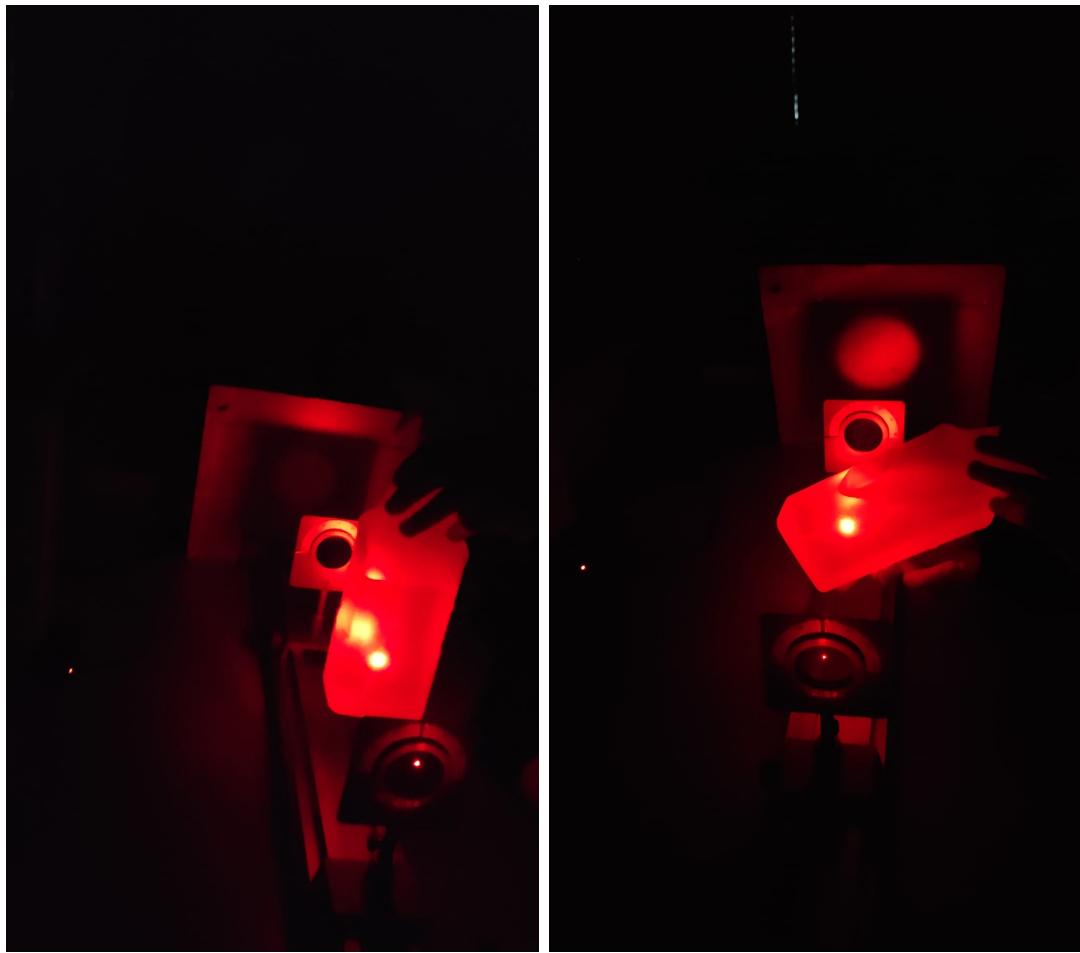


Figura 12: Girando la botella de desinfectante

Observamos que dependiendo de la orientación de los objetos que hemos introducido podemos observar algo de luz en la lámina o no. Esto se debe a una propiedad común en todos ellos, son materiales birrefringentes. Esto quiere decir que la polarización de la luz que los atraviesa depende de la orientación de estos, al rotarlos cambiamos el eje de polarización permitiendo de esta forma que parte de la luz polarizada en el primer polarizador vuelva a ser polarizada de manera que su eje no sea perpendicular al segundo eje, lo que permite que llegue algo de intensidad a la lámina final.

## 1.5. VECTOR DE STOKES

**Generar luz polarizada lineal horizontal y medir su vector de Stokes.**

El montaje de este experimento consiste lanzar un haz de luz con una polarización concreta, en el primer caso luz polarizada lineal horizontal, e interponiendo una serie de polarizadores, circular o lineal, medir la intensidad que nos llega y así poder obtener el vector de Stokes de ese tipo de luz.

El vector de Stokes se compone de la siguiente manera:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_{LH} - I_{LV} \\ I_{L45^\circ} - I_{L-45^\circ} \\ I_{CD} - I_{CL} \end{pmatrix} \frac{1}{I_0}$$

Siendo LH luz lineal horizontal, LV lineal vertical, L45º lineal rotado 45º ; CD y CL circular dextrógira y levógira.

Para la luz lineal horizontal obtenemos las siguientes intensidades (Lux):

$$S_{LH} = \begin{pmatrix} 52 \\ 36 - 1 \\ 19 - 18 \\ 17 - 18 \end{pmatrix} \frac{1}{52} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.673 \\ 0.019 \\ 0.019 \end{pmatrix}$$

Siendo el vector teórico:  $S_{LH,t} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  que no se aleja demasiado de nuestra medida.

**Generar luz polarizada circular y medir su vector de Stokes.**

En este caso el vector de Stokes nos da  $S_C = \begin{pmatrix} 43 \\ 15 - 15 \\ 16 - 11 \\ 25 - 0 \end{pmatrix} \frac{1}{43} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0.116 \\ 0.591 \end{pmatrix}$ , que se aproxima a

$S_{CD} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  luz circular dextrógira.

## 2. PRÁCTICA II: INTERFERENCIAS

### 2.1. EXPERIMENTO DOBLE RENDIJA DE YOUNG

El montaje de este experimento consta de un haz de luz monocromática con longitud de onda  $\lambda$  proveniente de un láser y una placa con rendijas separadas una distancia  $d$ . También necesitaremos una pared móvil, en nuestro caso una lámina de cartón y un metro para medir la distancia  $D$  que hay entre las franjas y la pared donde se proyectarán las interferencias.

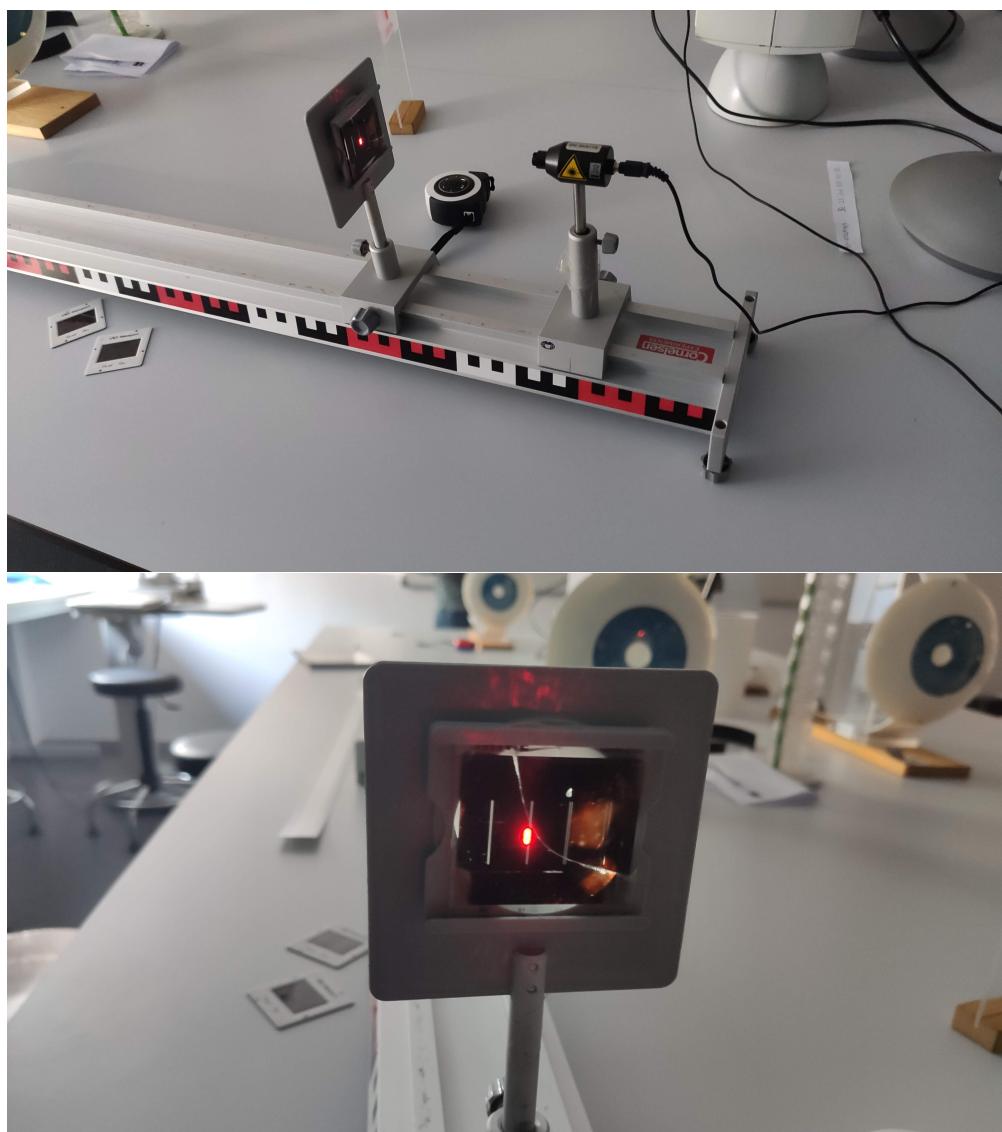


Figura 13: Montaje experimental

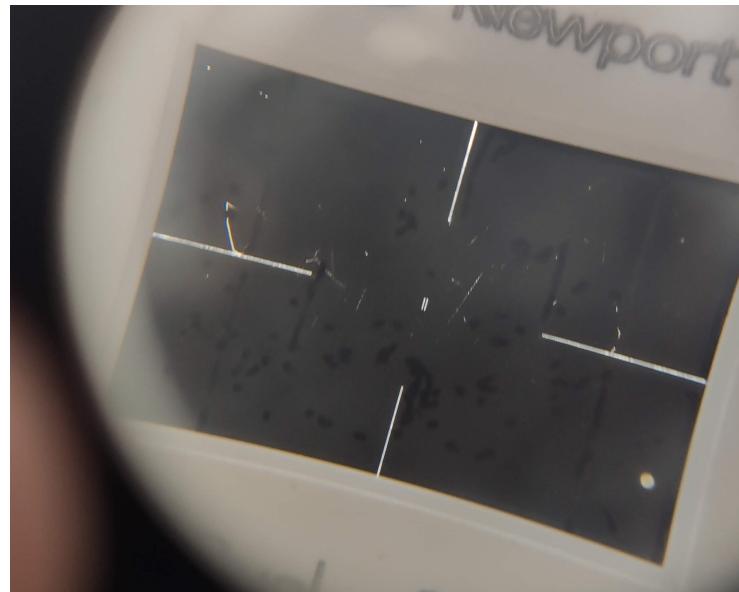


Figura 14: Rendijas vistas a través de una lente

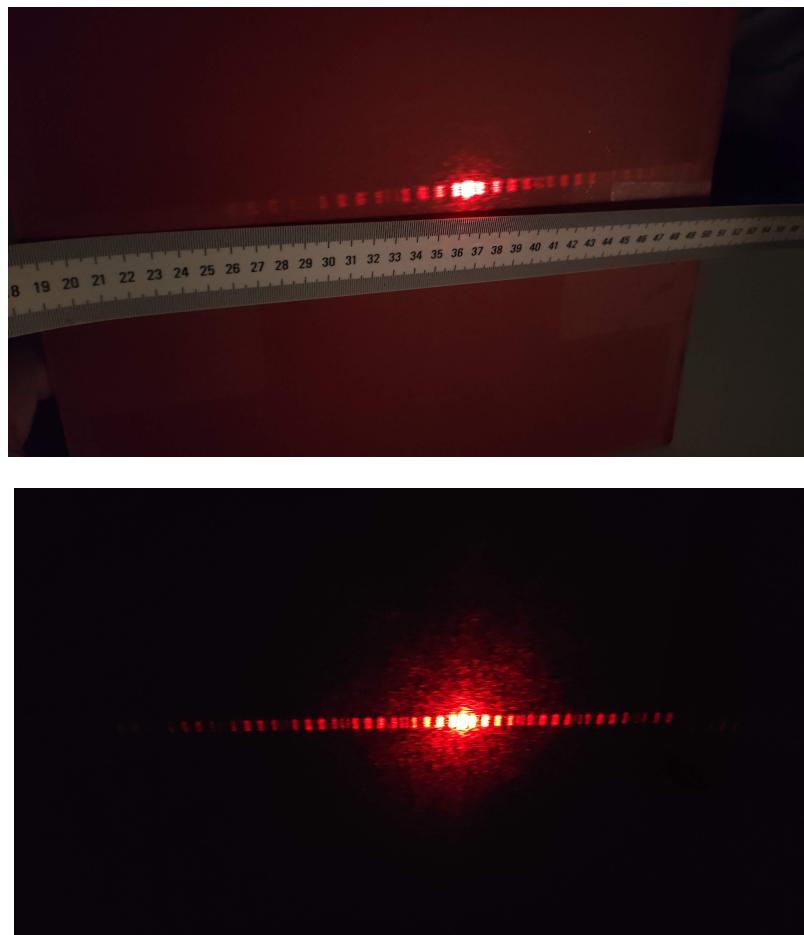


Figura 15: Proyección del patrón de interferencias a una distancia  $D$  con separación entre franjas de  $i$

Montad el experimento de la doble rendija de Young en el banco óptico. Conociendo las distancias del mismo y la distancia entre las rendijas determinar la longitud de onda del láser utilizado. Repetirlo para DOS separaciones de rendijas (0.25 y 0.5 mm). Obtened al menos TRES medidas para TRES posiciones diferentes de la pantalla. Estimad el error cometido.

Lo que ocurre es que cuando la luz pasa por las rendijas proyectará un patrón de interferencias en la pantalla, dándose los máximos según la siguiente ecuación:

$$X_m - X_{m+1} = i = \lambda \frac{D}{d}$$

Para la doble rendija con una separación  $d = 0.25\text{mm}$  obtuvimos los siguientes datos:

D(m)	i(cm)
2.5	2.5/4
3	3/4
4	4/4
4.5	4.4/4

Obtenemos  $\lambda = 600\text{nm}$  mediante ajuste lineal y para calcular su error usamos la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta i}{i}\right)^2}$$

Tomando  $\frac{\Delta D}{D}$  y  $\frac{\Delta i}{i}$  como 0.05 y  $\Delta d = 0.01\text{mm}$  obtenemos la expresión de  $\lambda$  con su error.

$$\lambda = 600 \pm 49\text{nm}$$

Montad el experimento de la doble rendija de Young en el banco óptico con la lámina “double-slit”. Conociendo la longitud de onda del láser (medida en  $i$ ), estimad la separación entre las dos rendijas. Obtener al menos TRES medidas para TRES posiciones diferentes de la pantalla. Estimad el error cometido.

En este caso el método para medir es el mismo que en el caso anterior, tomar  $D$  e  $i$  y hacer un ajuste lineal para obtener  $d$ .

D(m)	i(cm)
2	2.7/4
2.5	3.6/4
3.5	4.8/4
4.5	6.3/4

De realizar el ajuste lineal con estos datos obtenemos  $d = 0.171 \pm 0.018\text{mm}$ .

Montad el experimento de las franjas de Young para 3, 4 y 5 rendijas. Comparad el patrón interferencial obtenido con el de dos rendijas. Tomad fotos de cada patrón.

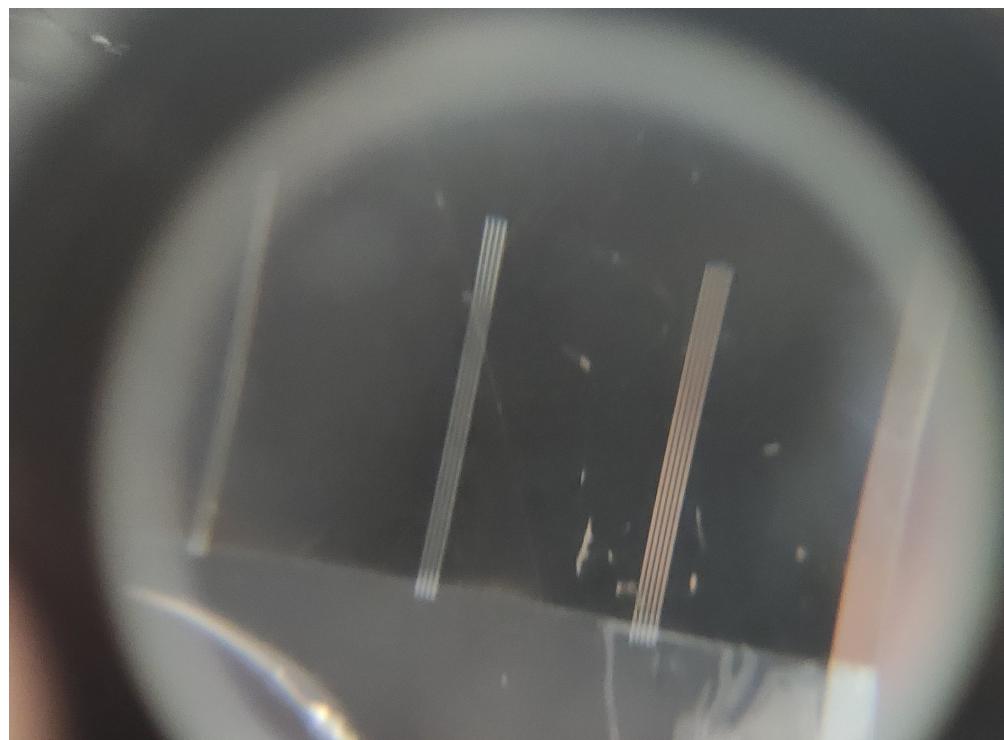


Figura 16: Rendijas bajo lente, que no se aprecian a simple vista

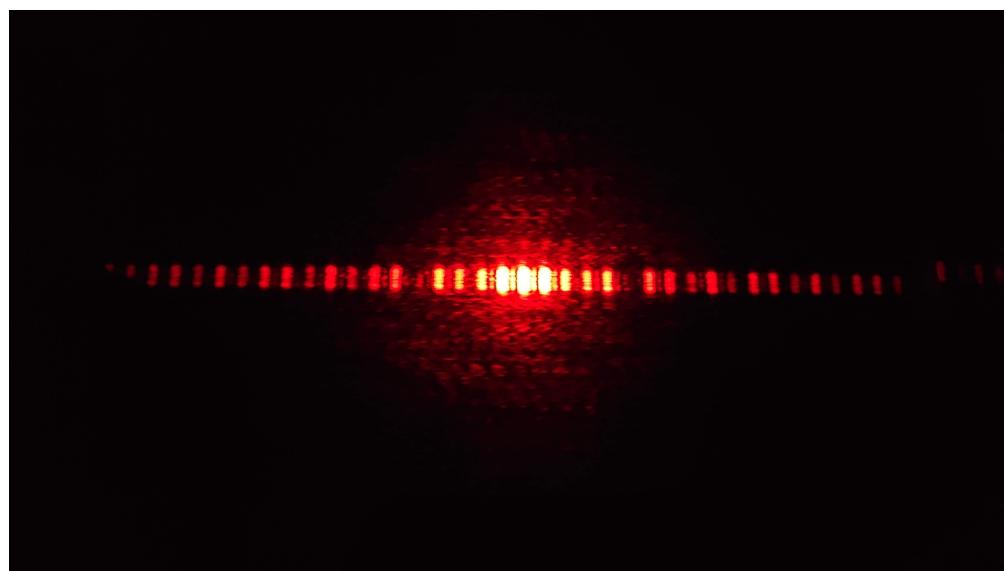


Figura 17: 3 rendijas

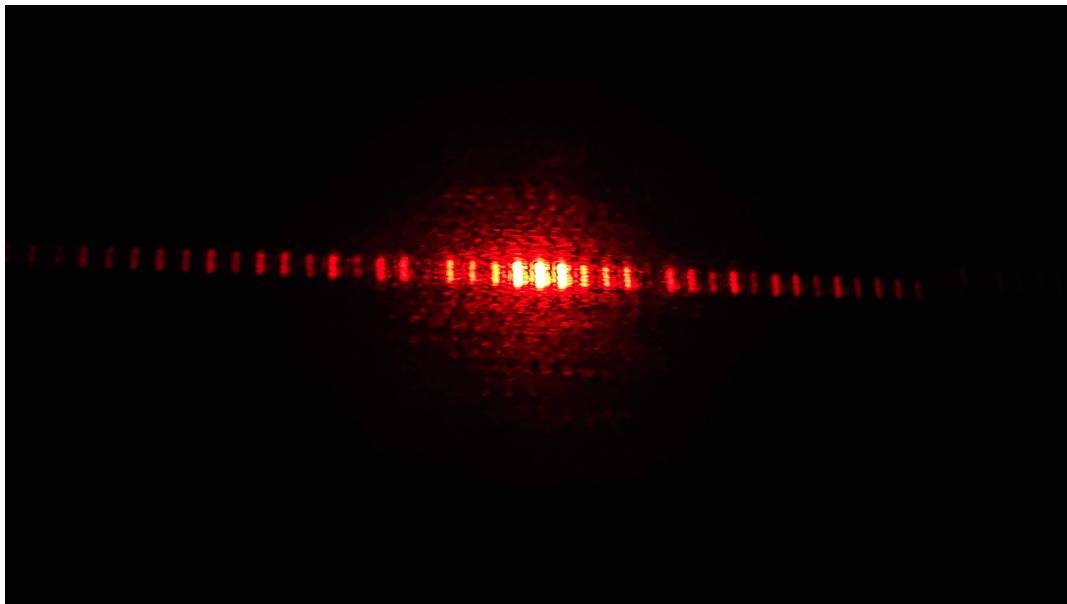


Figura 18: 4 rendijas

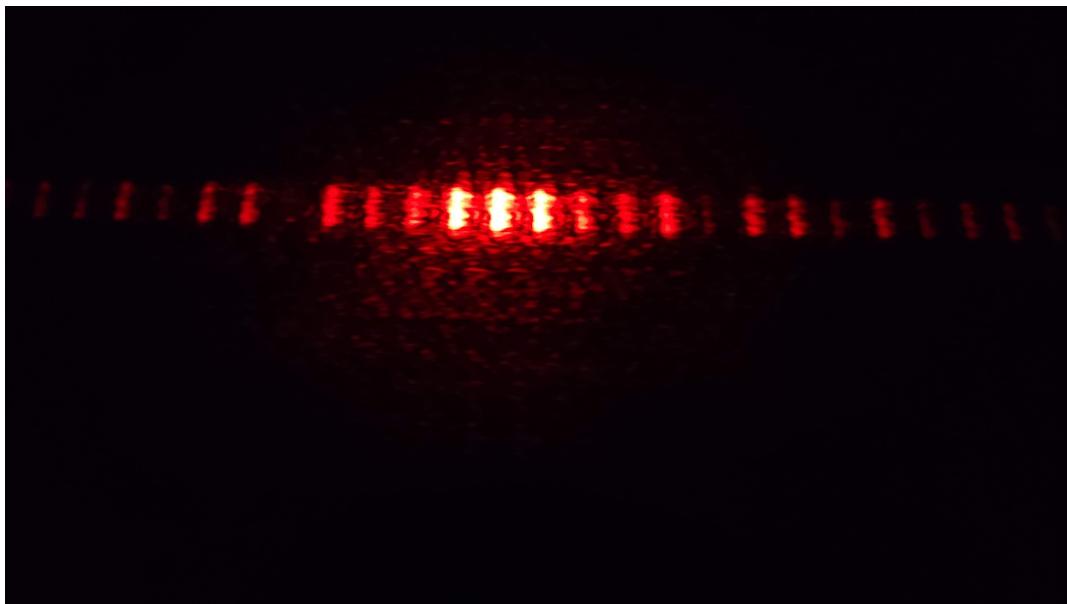


Figura 19: 5 rendijas

Vemos que a partir de 2 rendijas aparecen máximos de menor intensidad entre los máximos que veíamos con 2 rendijas (los de mayor intensidad). El número de máximos de menor intensidad situados entre los máximos mayores dependen del número  $n$  de rendijas. Según la teoría debe haber  $m$  máximos  $m = n - 2$ . Esto coincide con lo visto en el laboratorio, para 3 rendijas vemos 1 máximo de menor intensidad, para 4 vemos 2 y para 5 rendijas son 3, aunque en el último caso no se aprecia suficientemente bien.

## 2.2. INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

Alinead adecuadamente el interferómetro de Michelson. Para conseguir interferencias (anillos) debe reglarse con mucho cuidado la orientación de los espejos. Tened en cuenta que muy pequeñas vibraciones harán desaparecer los anillos. Tomad fotos de los anillos de interferencia. (Tened en cuenta que cualquier movimiento emborrona las franjas).

El montaje experimental del interferómetro de Michelson consta de un puntero láser (haz de luz puntual monocromático), un semi-espejo que separa el haz en dos partes que se dirigen a un espejo fijo o a un espejo ligado a un micrómetro para poder desplazarlo con precisión. Una vez la luz rebota en los espejos regresa al semi-espejo y ambos rayos se proyectan en una pantalla. Si el sistema está calibrado y no hay perturbaciones en el ambiente se debe apreciar un patrón de interferencias circular.

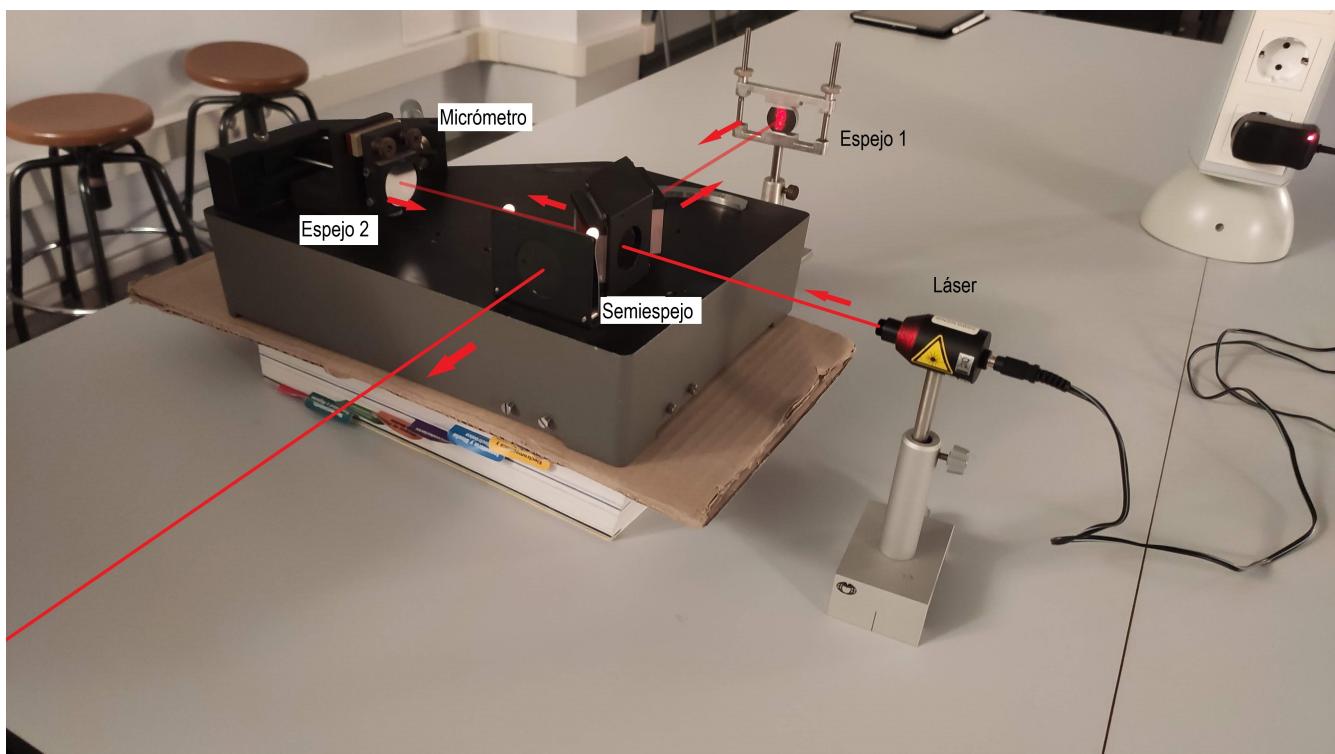


Figura 20: Montaje experimental

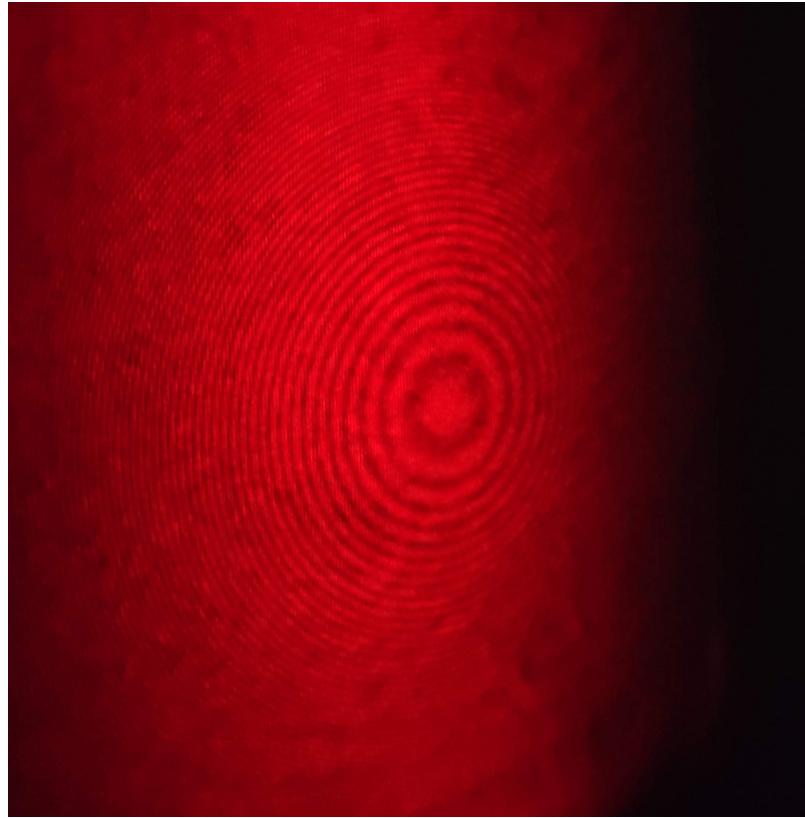


Figura 21: Franjas de interferencia

Una vez conseguidas los anillos adecuadamente centrados, desplazad el tornillo micrométrico del espejo móvil hasta tener un mínimo (oscuro) central. Seguir desplazando lentamente y observar los cambios de máximo (brillante) a mínimo (oscuro) central. Observad la estabilidad de los anillos al hablar o pisar fuerte en el suelo. Recordad que estamos detectando cambios del orden de la longitud de onda.

El interferómetro es muy sensible como se dice en el apartado, perturbaciones del orden de la longitud de onda son suficientes para emborronar la figura. Cualquier sonido es suficiente para alterar el patrón y emborronar las franjas. En el siguiente enlace encontramos un vídeo demostrativo <https://youtu.be/OKB01mVTTzY>.

Además cabe mencionar la rapidez con la que se calibró el interferómetro, siendo este tiempo de alrededor de 1 minuto. Algunos motivos por lo que fue posible fue que nuestro grupo era el único en esa sesión de prácticas reduciendo las vibraciones del ambiente, aunque principalmente se debe a que la fuente de luz era coherente, recordamos que se trata de un haz de luz prácticamente puntual con un ancho de banda estrecho. También debemos tener en cuenta que el montaje tenía las medidas adecuadas, pues el láser y la pantalla estaban dispuestos de manera óptima. Esto no sería así si por el contrario utilizáramos una bombilla de luz blanca y teniendo el montaje longitudes que no guarden relación con el experimento. De esta manera se tardarían horas en encontrar el patrón de interferencias en la pantalla.

### 3. PRACTICA III: DIFRACCIÓN

#### 3.1. DIFRACCIÓN DE FRAUNHOFER

Iluminar la pequeña rendija y observar el patrón de difracción a distancia suficiente. Conociendo la longitud de onda del láser utilizado (635 nm para el láser de diodo) y las distancias del experimento (posición de la pantalla de observación y los tamaños de la figura de difracción (que se deben medir), estimar el tamaño de la rendija. Repetir para varias posiciones de la pantalla. Comparar con la figura de interferencias de dos rendijas de la práctica II y hacer los comentarios oportunos.

El montaje de este experimento consta de una rendija de anchura  $a$ , un puntero láser de 635nm con el que atravesaremos a la rendija y una pantalla a una distancia  $D$ . También incorporaremos una doble rendija para comparar el patrón de interferencia.

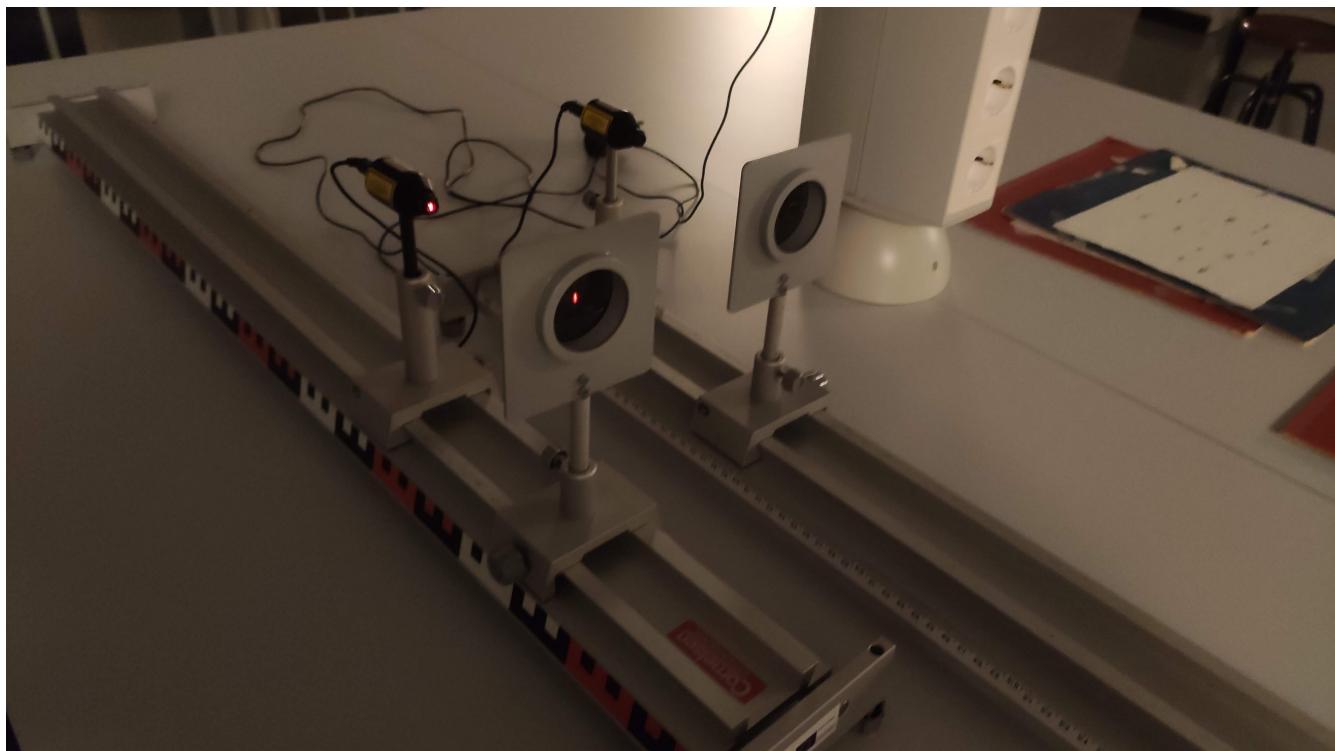


Figura 22: Montaje experimental

Según la teoría, en la pantalla se proyectará un patrón de interferencias con máximos y mínimos de la intensidad de la luz. La distancia a la que se encuentran estos máximos entre sí,  $\Delta x$ , viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2a} D$$

Como vimos en la práctica anterior, cuando hay dos rendijas se superponen el patrón de difracción de una rendija con el patrón de interferencias de dos.

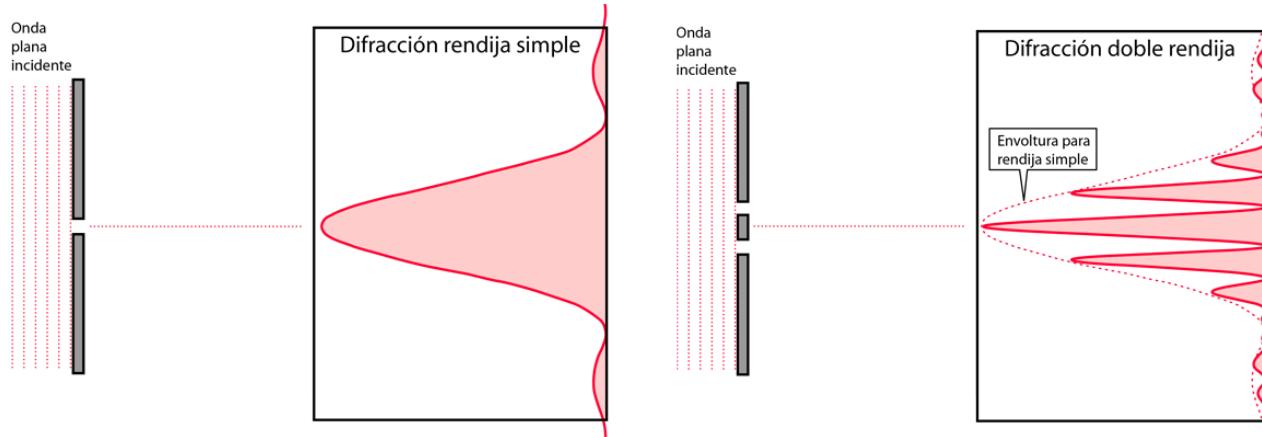


Figura 23: Esquema teórico

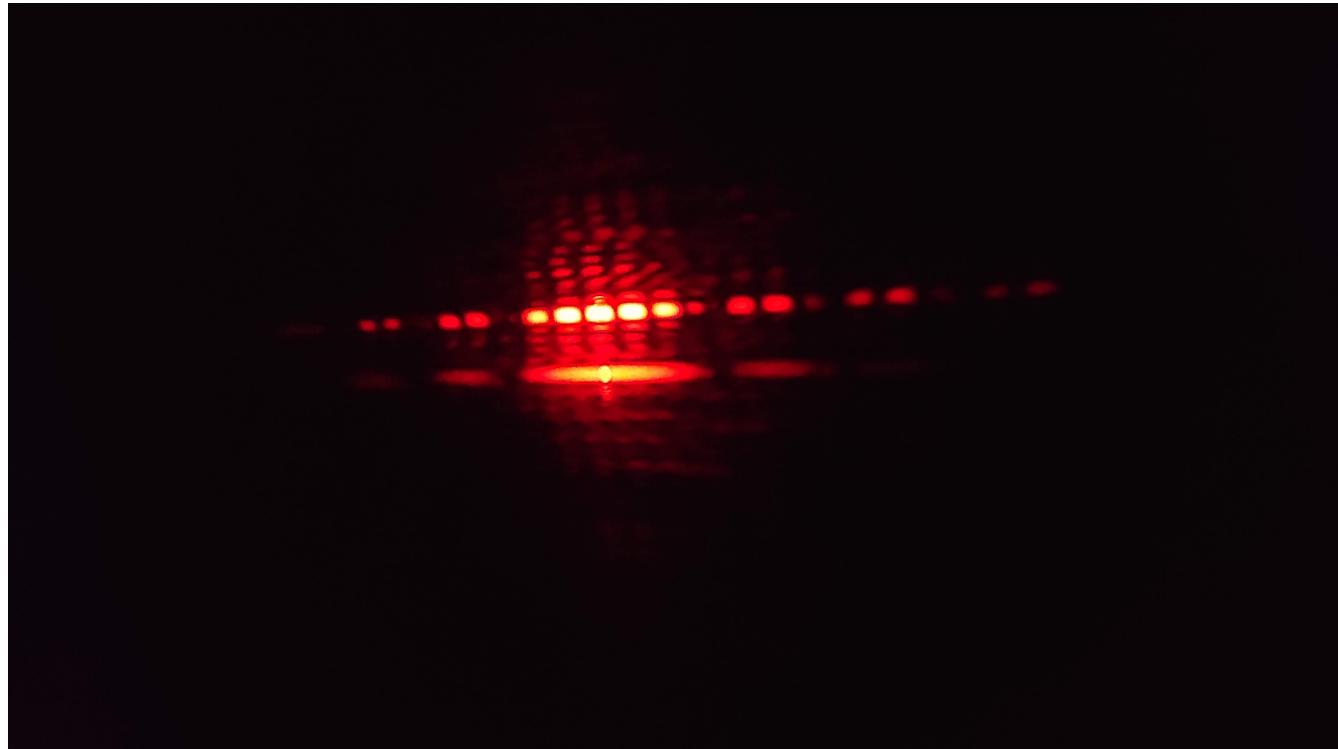


Figura 24: Proyección en la pantalla

Tomaremos varios valores de  $D$  y  $\Delta x$  y con ello realizaremos un ajuste lineal.

D(m)	$\Delta x$ (cm)
0.78	0.9
1.98	1.75
2.18	2.1
3.2	3

Del ajuste lineal obtenemos que  $\frac{\lambda}{2a} = 8.71 \cdot 10^{-3}$ . Por lo tanto:

$$2a = 0.0689 \pm 0.0055\text{mm}$$

### 3.2. RED DE DIFRACCIÓN

En uno de los bancos determinar la ecuación de la red de difracción por transmisión. Conociendo la longitud de onda de la luz del láser utilizado, medir la posición de los diferentes órdenes difractados y obtener los datos de la red.

En esta ocasión vamos a analizar una red de difracción, una lama llena de rendijas con misma anchura  $a$  y misma separación  $d$ , verticales en nuestro caso.

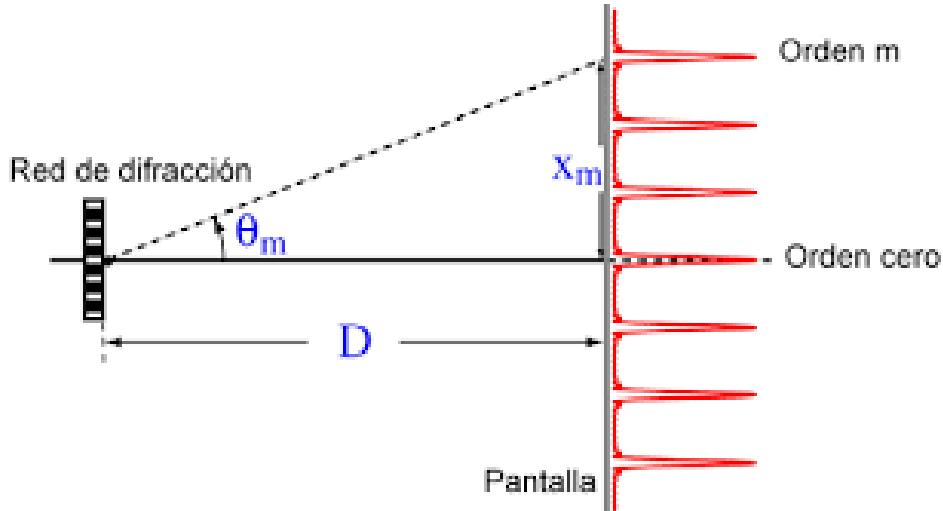


Figura 25: Esquema teórico

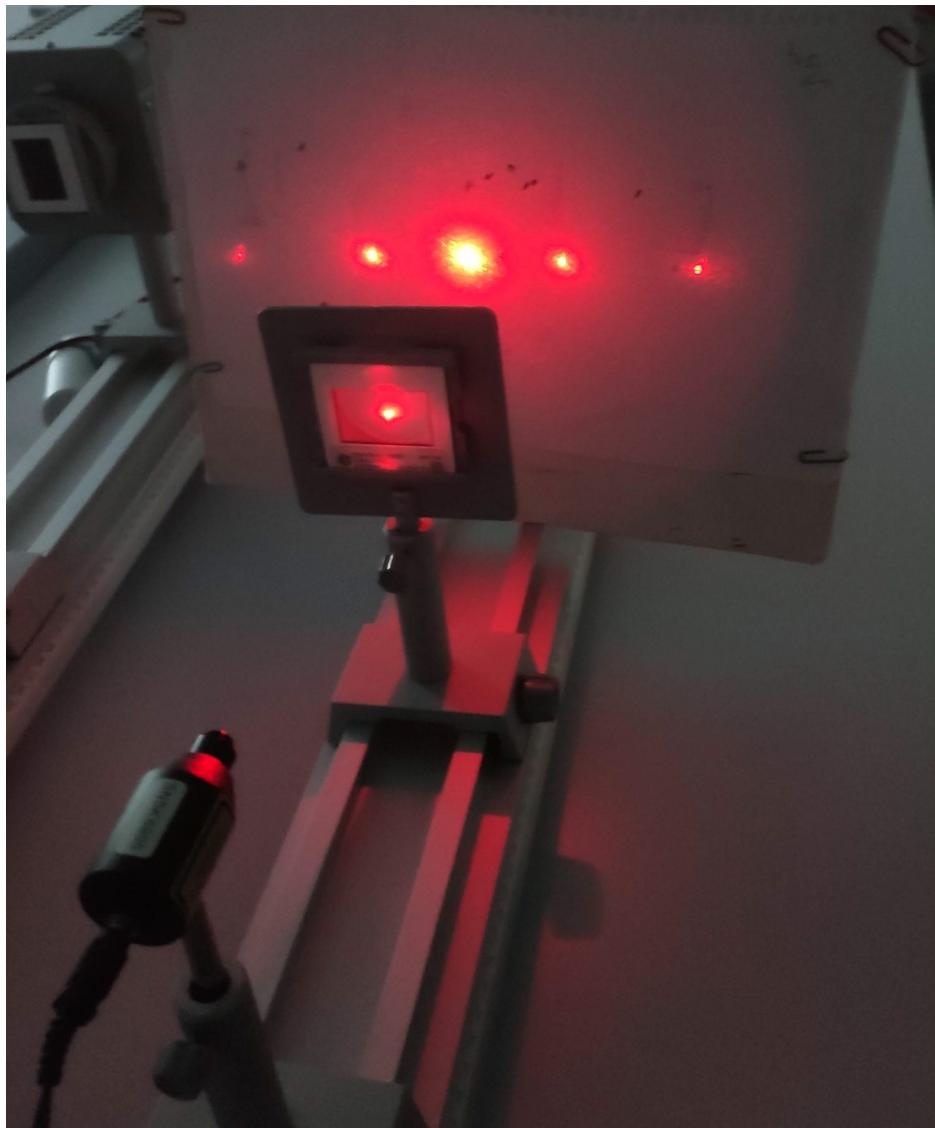


Figura 26: Montaje experimental

Procederemos análogamente al apartado anterior con la fórmula  $\Delta x = \frac{\lambda}{2d}D$ .

D(cm)	$\Delta x$ (cm)
5	2.3
16	5.9
22	8
30	10.5

La pendiente obtenida del ajuste lineal es 0.3295. Por lo que teniendo en cuenta que  $\lambda = 615\text{nm}$  en este caso nos queda:

$$\frac{1}{2d} = 535.8 \pm 6.7 \text{ franjas/mm}$$

### 3.3. LONGITUD DE ONDA DE RAYAS ESPECTRALES

Utilizad la red de difracción en transmisión estudiada en el apartado ii). Encended la lámpara de descarga. Colocar la red en incidencia normal. Reglar el ocular y enfocarlo hasta ver nítida la rendija. Ajustar el tamaño de la rendija (inicialmente grande para localizar las líneas y más estrecho cuando queráis tener más resolución). Enumerar TODAS las rayas espectrales que se distinguen. Haced un dibujo de las mismas. Para localizar las líneas más débiles, apagar todas las luces y adaptarlos a la oscuridad. Medir el ángulo para cada una de ellas, relativo a la incidencia normal (ajustando el retículo). Conociendo el parámetro de la red obtener la longitud de onda de cada una de las rayas espectrales. Deducir el tipo de lámpara a partir del espectro.

En este caso como la luz no es monocromática la red de dispersión separa los colores en función del ángulo.

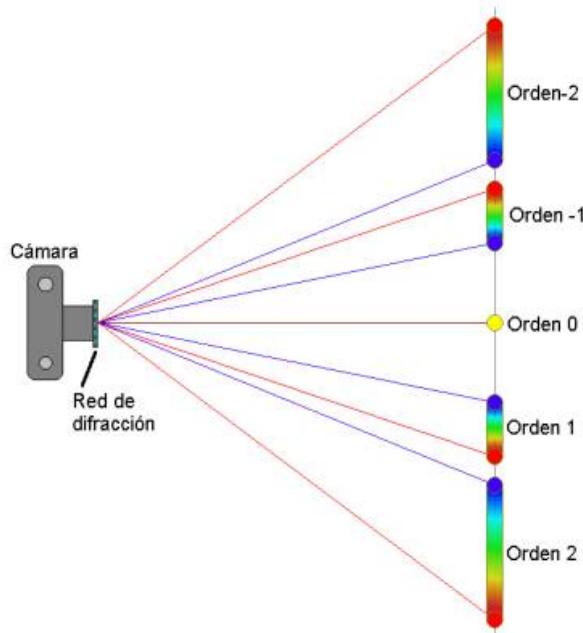


Figura 27: Esquema red de difracción

Contando con esto, utilizaremos como fuente de luz un gas excitado mediante aplicación de voltaje, pues sabemos cada elemento tiene un espectro de emisión característico. Dicho esto trataremos de averiguar el elemento contenido en la lámpara.

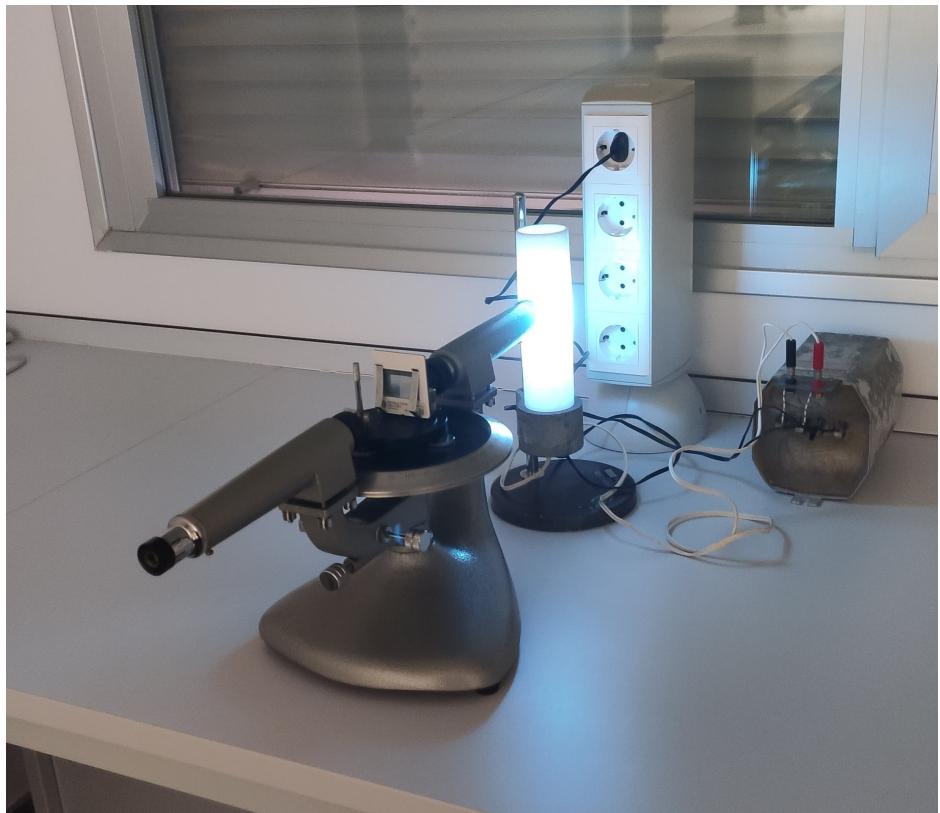


Figura 28: Montaje experimental

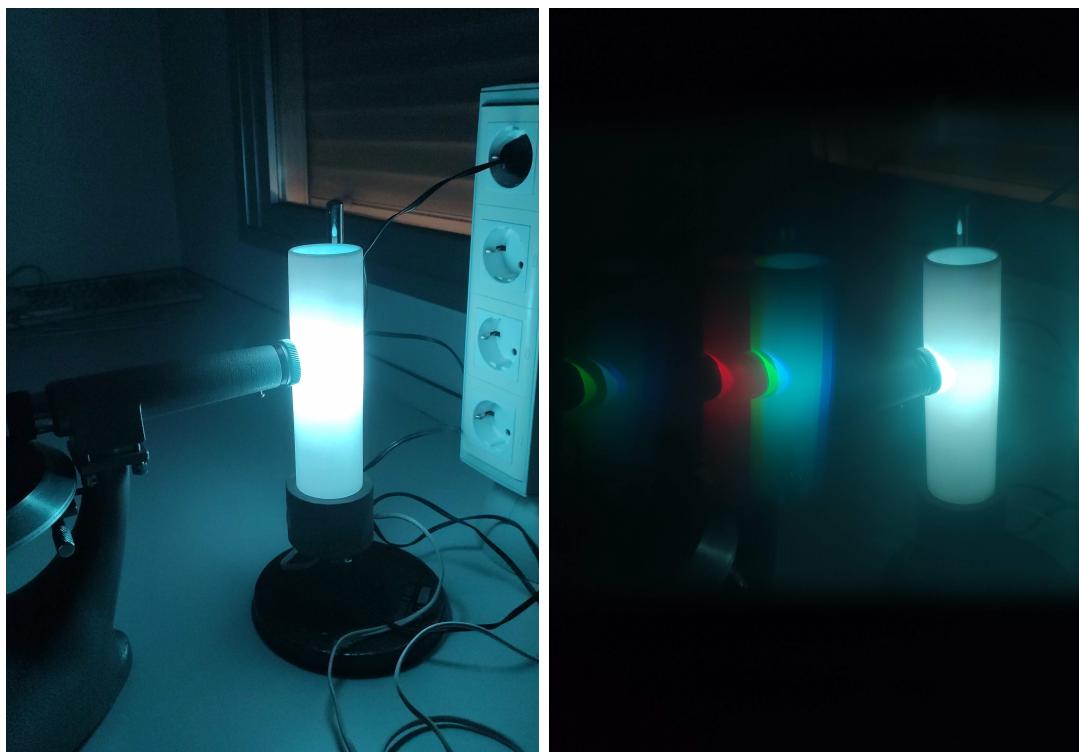


Figura 29: Lampara a través de la red de difracción

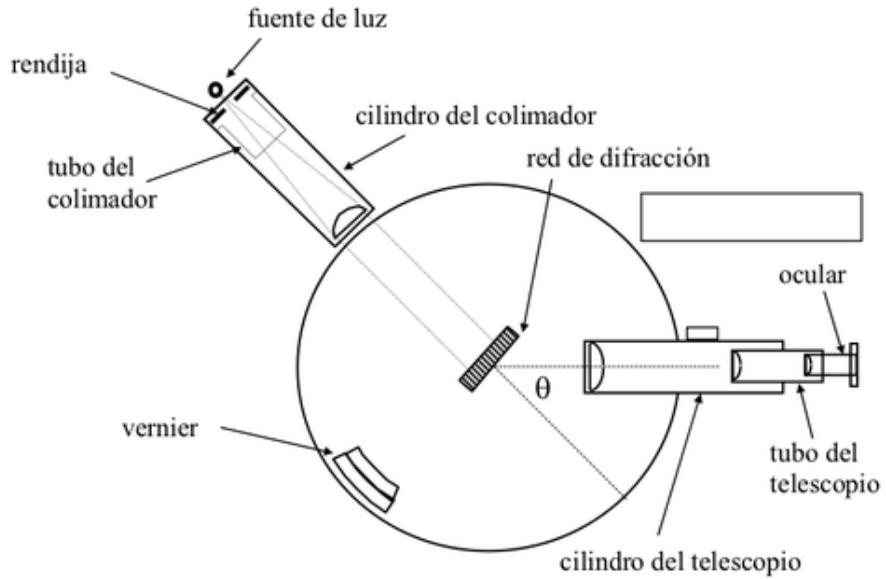


Figura 30: Esquema del montaje

En el esquema anterior podemos apreciar como funciona el aparato con el que mediremos ángulos para cada franjapectral que visualicemos.



Figura 31: Medida de ángulo para la franja verde

Según la teoría, los ángulos dependen de la longitud de onda de la siguiente forma

$$2d \sin \theta = m\lambda$$

donde  $d$  es el parámetro de la red de difracción medido en el apartado anterior,  $\theta$  el ángulo relativo entre la franja medida y la de orden 0,  $m$  es el orden de las líneas en nuestro caso  $m = 1$ , y finalmente  $\lambda$  es la longitud de onda de la linea en cuestión. Aproximando el seno al ángulo nos queda:

$$d\Delta\theta_i = \lambda_i$$

Los datos obtenidos son:

Color	$\theta$ (°)	$\Delta\theta$ (°)	$\lambda$ (nm)
Turquesa (orden 1)	28.7	0	—
Azul oscuro	42.4	14	474
Azul claro	42.7	14.8	484
Verde	43.6	18.5	514
Rojo	47.8	19	654

Podemos apreciar que las longitudes de onda del espectro de emisión se aproximan al cadmio. En la simulación encontrada en internet recomiendo bajar la intensidad de las líneas porque de lo contrario aparecen demasiadas franjas.

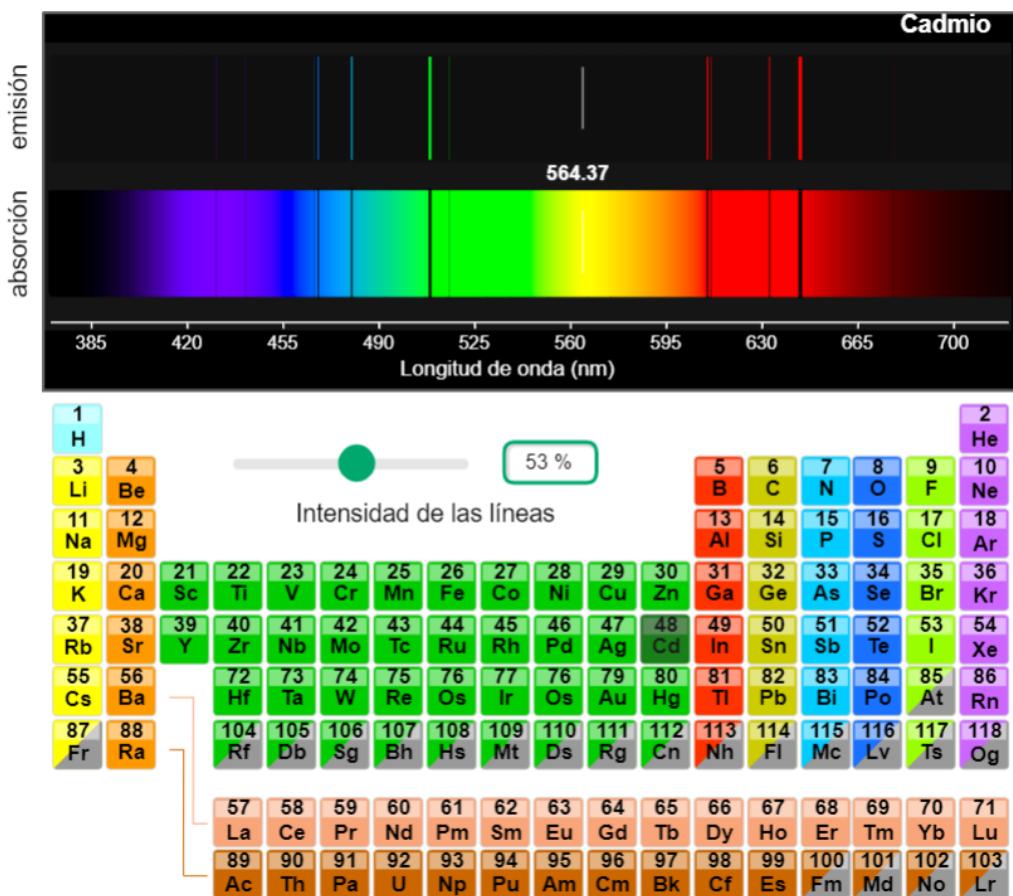


Figura 32: Espectro de emisión Cd

## 4. CONCLUSIÓN

Las prácticas de Óptica II me han resultado muy útiles para asentar los conocimientos teóricos impartidos en clase y a su vez me han parecido realmente divertidas, ya que experimentos como el interferómetro de Michelson resultan muy llamativos y como somos capaces de medir longitud de onda nanométricas y densidad de franjas en una red de dispersión con medidas de ordenes de magnitud mayores como centímetros o metros. También me gustaría valorar positivamente la sesión de exposición de la Práctica 0 hecha en clase.