



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2022/2023

Nº de proyecto 101

Desarrollo de experiencias prácticas para el aprendizaje activo en Óptica

Responsable del Proyecto: Sonia Melle Hernández

Facultad de Óptica y Optometría

Departamento Óptica

## 1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

En la presentación inicial del proyecto, se establecieron objetivos clave para mejorar la comprensión y el compromiso de los estudiantes con los conceptos relacionados con la luz en el contexto de los estudios de Óptica. Estos objetivos incluyeron la creación de experiencias prácticas que fomentaran un aprendizaje activo, la implementación de actividades interactivas para profundizar la comprensión teórica y la promoción de la participación proactiva de los estudiantes en la exploración de fenómenos ópticos.

El proyecto se centró en abordar la desconexión entre la teoría más abstracta y la experiencia práctica en asignaturas de alto contenido en física y matemáticas, específicamente en grados de Ciencias de la Salud. El objetivo principal fue paliar la falta de motivación de los estudiantes al enfrentarse a conceptos áridos y excesivamente matemáticos. Se propuso desarrollar y proporcionar experiencias prácticas caseras, diseñadas para involucrar a los alumnos de forma proactiva y mejorar su comprensión de la naturaleza de la luz y su interacción con el entorno.

El proyecto se originó a raíz de la creciente dificultad de los docentes para impartir asignaturas teóricas con un marcado contenido en física y matemáticas, particularmente en asignaturas troncales como las asignaturas de Física, Óptica Física y Óptica Biomédica en el Grado de Óptica y Optometría. La observación de esta problemática nos llevó a proponer la integración de ejemplos prácticos reales como un medio para consolidar y fortalecer los contenidos teóricos.

## 2. Objetivos alcanzados

Durante el desarrollo del proyecto, se han logrado avances significativos en la consecución de los objetivos establecidos. Se implementaron actividades prácticas innovadoras que permitieron a los estudiantes experimentar directamente sobre los principios de la óptica. Además, se observó un aumento en el compromiso y la participación de los alumnos, reflejado en su mejor comprensión de los conceptos relacionados con los fenómenos ópticos estudiados.

Como primer objetivo del proyecto se identificaron una serie de experimentos simples y accesibles que abarcasen conceptos fundamentales de óptica sin requerir materiales especializados ni montajes complejos de laboratorio. Seguidamente, se elaboró un manual interactivo en formato Jupyter Notebook de cada fenómeno incluyendo una descripción detallada de cada experiencia práctica acompañada de vídeos explicativos. Se puso a disposición de los alumnos proporcionando una guía completa, sencilla y accesible para la realización de las actividades prácticas propuestas.

Durante el curso, se llevaron a cabo algunas de estas experiencias, lo que facilitó a los alumnos un acercamiento directo a los conceptos estudiados, mejorando significativamente su comprensión de estos fenómenos.

El logro de estos objetivos representa un hito significativo en el proyecto, ya que ha permitido la creación de recursos educativos prácticos y accesibles que cumplen con el propósito de acercar los conceptos teóricos de Óptica a experiencias tangibles y comprensibles para los estudiantes. La implementación exitosa de estas actividades prácticas y la disponibilidad del manual interactivo al alcance de cualquier alumno o docente representan un avance importante hacia la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Óptica en el ámbito de las Ciencias y Ciencias de la Salud.

### **3. Metodología empleada en el proyecto**

La metodología adoptada se centró en la combinación de experimentación práctica y teoría, utilizando herramientas y materiales específicos como laboratorios interactivos, demostraciones en vivo y actividades prácticas de aprendizaje colaborativo para garantizar una comprensión integral de los fenómenos ópticos.

Dicha metodología se enfocó en la creación de experiencias prácticas caseras que conectaran los conceptos teóricos de Óptica con la vida cotidiana de los estudiantes. Se diseñaron actividades interactivas, utilizando materiales simples y accesibles, con el objetivo de motivar y comprometer a los alumnos en un aprendizaje activo. Se elaboró un manual interactivo en Jupiter Notebook que detalla estas experiencias prácticas, proporcionando a la comunidad docente una herramienta integral para implementar este enfoque innovador en la enseñanza.

El enfoque metodológico basado en el aprendizaje activo fomentó la participación proactiva de los alumnos, permitiéndoles no solo presenciar los fenómenos ópticos, sino también reflexionar sobre ellos, formular hipótesis, plantear preguntas y analizar los resultados obtenidos. Esta metodología facilitó una comprensión más profunda y duradera de los conceptos estudiados, promoviendo el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y resolución de problemas en los estudiantes.

### **4. Recursos humanos**

El equipo humano implicado en este proyecto ha sido multidisciplinar, compuesto por cuatro profesores especializados en el área de Óptica, uno de ellos experto en tecnología educativa, y un estudiante de doctorado egresado del Grado de Óptica y Optometría, el cual ha proporcionado información valiosa sobre las dificultades reales que encuentran los alumnos a la hora de enfrentarse a asignaturas con alto contenido abstracto. La colaboración entre todos ellos ha sido esencial en la consecución de las actividades propuestas.

Este equipo docente ha demostrado una sólida experiencia en el desarrollo exitoso de proyectos de innovación educativa y mejora de la docencia. Cada miembro del equipo cuenta con una extensa trayectoria en la enseñanza de asignaturas enfocadas en física y matemáticas, entre ellas Óptica Física, Física y Óptica Biomédica. Esta profunda experiencia académica ha sido fundamental para alcanzar los objetivos planteados en el proyecto.

Para una organización eficaz del trabajo, se asignó un coordinador distinto para cada fase del proyecto. E. Cabrera-Granado, con su destacada experiencia en el uso de entornos de cálculo interactivo como Jupyter Notebook, ha liderado exitosamente la fase final. Su experiencia técnica ha garantizado la calidad y funcionalidad del material generado en la elaboración de la memoria interactiva en dicho entorno.

El equipo docente, formado por Oscar G. Calderón, F. Encinas, E. Cabrera-Granado y Sonia Melle, respaldado por el desarrollo previo de experiencias piloto en asignaturas afines, ha logrado consolidar y enriquecer las estrategias pedagógicas propuestas en este proyecto. La colaboración estrecha con el estudiante integrante del equipo, Alejandro Casillas-Rubio, ha enriquecido significativamente la implementación de las experiencias prácticas propuestas.

La combinación de la vasta experiencia académica y docente del equipo, apoyada por el éxito en el desarrollo de experiencias piloto y la valiosa contribución del estudiante, ha asegurado la ejecución exitosa del proyecto en concordancia con los términos planteados. Esta colaboración multidisciplinaria ha garantizado la calidad y efectividad en la implementación de las estrategias didácticas propuestas.

## 5. Desarrollo de las actividades

Las actividades se dividieron en sesiones teórico-prácticas que abarcaron desde la introducción de conceptos básicos hasta la realización de experimentos con dispositivos ópticos sencillos y simulaciones interactivas que permitieron a los estudiantes explorar diversas aplicaciones y fenómenos ópticos.

Se diseñaron una serie de experimentos sencillos específicamente orientados a permitir a los alumnos explorar fenómenos relacionados con la luz en el contexto de los estudios de Óptica. Estos experimentos fueron concebidos con el propósito de promover un aprendizaje activo, alentando a los estudiantes a participar activamente en la observación, ejecución y reflexión sobre los fenómenos ópticos.

Los experimentos, cuidadosamente seleccionados, involucraron la construcción y manipulación de dispositivos simples para ilustrar principios ópticos fundamentales. Por ejemplo, se llevaron a cabo actividades donde los estudiantes construyeron un espectrómetro casero con el fin de medir los espectros de diferentes fuentes de luz que se encuentran comúnmente en casa. En otras actividades los estudiantes trabajaron sobre la polarización de la luz comprendiendo cómo varía la intensidad de la luz polarizada que atraviesa láminas polarizadoras en diferentes configuraciones, o explorando el estado de polarización de la luz reflejada por distintas superficies de su entorno o por medios heterogéneo ópticamente diluidos. En otras experiencias los alumnos trabajaron sobre el fenómeno de la birrefringencia generando una composición artística con láminas de papel celo.

Estas prácticas proporcionaron una experiencia directa que complementó la teoría presentada en el aula. Este enfoque práctico y reflexivo ha demostrado ser altamente efectivo para involucrar a los alumnos en su proceso de aprendizaje, brindándoles una base sólida para comprender los principios ópticos de manera significativa y duradera.

Finalmente se ha puesto a disposición de la comunidad docente el manual interactivo desarrollado, con el fin de no solo enriquecer el proceso de enseñanza-aprendizaje en estas asignaturas, sino también inspirar a otros educadores a adoptar enfoques similares que promuevan la participación proactiva y la conexión entre la teoría y la experiencia práctica para mejorar el entendimiento de conceptos complejos.

## 6. Anexos

Se adjunta al informe una selección de los materiales didácticos desarrollados en formato PDF, así como el enlace al manual interactivo en Jupiter Notebook que proporciona una guía completa, sencilla y accesible para la realización de las actividades prácticas relacionadas con las experiencias caseras seleccionadas.

<https://ecabrera granado.github.io/ExperienciasOpticaFisical/intro.html>

# Desarrollo de experiencias prácticas para el aprendizaje activo en Óptica

## Contenido

- EXPERIENCIA CASERA 1
- Construcción de un espectrómetro. Espectros de fuentes y transmitancia
- EXPERIENCIA CASERA 2
- Polarizadores y Ley de Malus
- EXPERIENCIA CASERA 3
- Medios anisótropos

Este libro pretende describir algunos pequeños experimentos sobre contenidos de Óptica que se pueden realizar en casa, complementando tanto clases teóricas en aula como experimentos más controlados en un laboratorio que se pueden impartir en un curso de esta materia.

Las experiencias descritas comprenden el análisis y medida de varios espectros de fuentes que pueden encontrarse en casa, análisis de la ley de Malus con dos láminas polarizadoras y estudio de medios birrefringentes para comprender las láminas retardadoras.

## EXPERIENCIA CASERA 1

### Construcción de un espectrómetro. Espectros de fuentes y transmitancia

Esta experiencia se puede programar para ser realizada en directo en un clase o se puede organizar como un trabajo individual o en grupo para realizar fuera del aula.

#### Introducción

La teoría electromagnética clásica establece que las cargas aceleradas emiten radiación. Así, la carga oscilante en una antena de radio emite ondas de varios metros de longitud de onda. Los cuerpos calientes también emiten radiación. Así, si calentamos un hierro a una temperatura de 1000°C, podemos verlo al rojo vivo o amarillo y si subimos la temperatura aparecerá pálido, indicando que emite radiación de diferente frecuencia e intensidad. El filamento caliente de una bombilla produce luz de esta manera.

Para explicar la radiación emitida por los átomos, en 1913 el físico danés Niels Bohr introdujo un modelo cuántico del átomo en el que los electrones ocupan unas configuraciones estables. Esto daba lugar a una serie discreta de niveles energéticos y por tanto a la emisión de radiación con longitudes de onda relacionadas con dichos niveles de energía. Así Bohr obtuvo una fórmula general que predecía las longitudes de onda de la radiación emitida por el átomo de hidrógeno. Para observar el espectro de la radiación emitida por diferentes fuentes de luz se hace pasar la radiación a través de un elemento óptico dispersor, por ejemplo un prisma o una red de difracción, que separe espacialmente las distintas longitudes de onda. Se obtiene así su espectro tal y como se muestra en la Figura 1. Esta emisión se produce al excitar el material de alguna manera, calentándolo o produciendo sobre él una descarga eléctrica.

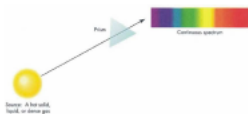


Figura 1: Medida del espectro de emisión de una fuente.

Las fuentes de luz pueden ser empleadas para obtener información sobre la absorción de otros medios materiales. Si hacemos pasar la radiación de una fuente a través de una nube de un cierto gas, y luego a través del prisma, el espectro obtenido es diferente al de la fuente, siendo estos cambios provocados por el gas. Comparando ambos espectros se obtiene el espectro de absorción del gas que nos dice las radiaciones que han sido absorbidas por los átomos o moléculas del gas y por tanto han desaparecido.

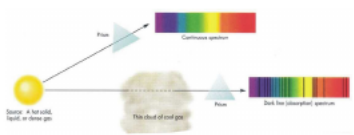


Figura 2: Medida del espectro de absorción de un gas.

## Construcción del espectrómetro

El espectrómetro casero que vamos a construir es una iniciativa llevada a cabo por **Public Lab** que es una asociación sin ánimo de lucro dedicada a la divulgación de la ciencia. La información de su proyecto Papercraft Spectrometer Intro Kit se encuentra en <https://publiclab.org/wiki/papercraft-spectrometer>

Necesitaremos los siguientes materiales:

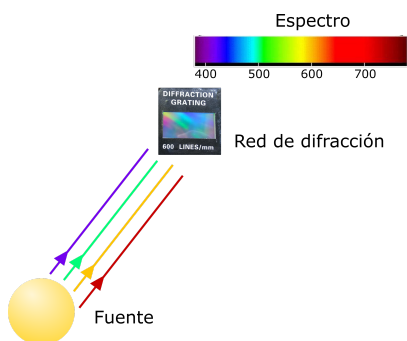
- cartulina negra o papel grueso de color oscuro para construir el espectrómetro
- plantilla recortable proporcionada en la web: <https://publiclab.org/wiki/papercraft-spectrometer>
- tijeras, cúter
- pegamento, celo
- DVD-R que juega el papel de elemento dispersor que separa los colores (red de difracción o prisma)

Las instrucciones del montaje aparecen en la página web anterior. A continuación mostramos un video resumen.

0:00

## Espectros de emisión de fuentes de luz

Para observar el espectro de la radiación emitida por diferentes fuentes de luz la radiación debe pasar por un elemento óptico dispersor, por ejemplo un prisma o una red de difracción, que separe espacialmente las distintas longitudes de onda o colores. Así se obtiene su espectro tal y como se muestra en la figura. Esta emisión se produce al excitar el material de alguna manera, calentándolo o produciendo una descarga eléctrica sobre el material.

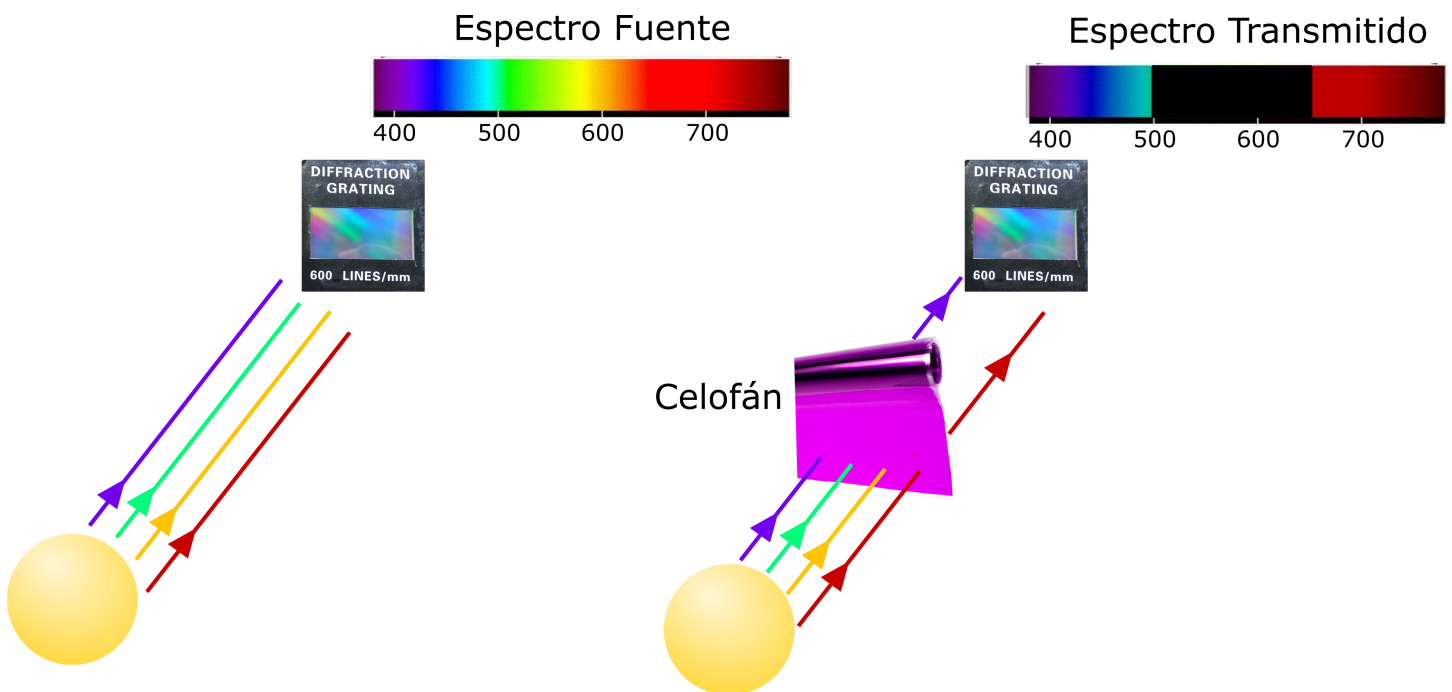


Emplearemos el espectrómetro casero para analizar la composición espectral de distintas fuentes de luz, es decir, qué colores o longitudes de onda contiene la fuente. En el siguiente vídeo se muestran varios ejemplos.

0:00

## Espectro de absorción del papel celofán

Se analiza espectralmente la absorción de un trozo de papel celofán transparente coloreado. Para ello la radiación de una fuente de luz blanca se hace pasar a través del trozo de celofán y luego a través del elemento dispersor (red de difracción). Este espectro será diferente al de la fuente de luz, siendo estos cambios provocados por el papel celofán (ver la siguiente figura). Comparando ambos espectros se obtiene el espectro de absorción del celofán que nos dice las radiaciones que han sido absorbidas.



La transmitancia (usualmente denominada  $T$ ) es la razón entre la intensidad transmitida por el celofán coloreado y la intensidad incidente (intensidad de la fuente de luz). Esta magnitud nos indica la proporción de luz que transmite el material para cada longitud de onda.

$$T = \frac{I_{\text{transmitida}}}{I_{\text{incidente}}}$$

En el siguiente vídeo se muestra cómo medir el espectro de transmisión del papel celofán transparente coloreado con el espectrómetro casero.

0:00

# EXPERIENCIA CASERA 2

## Polarizadores y Ley de Malus

Para realizar esta experiencia es necesario disponer de dos pequeñas láminas polarizadoras que se pueden comprar en muchos establecimientos. A modo de ejemplo el [siguiente enlace](#) lleva a la tienda de Amazon donde aparecen diferentes propuestas de láminas polarizadoras. NOTA: Los autores no tienen ninguna relación con Amazon y únicamente se proporciona dicho enlace con el fin de facilitar la búsqueda de las láminas.

### Introducción

Las ondas electromagnéticas planas son ondas vectoriales transversales: el campo eléctrico de la onda oscila contenido en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la misma. Sin embargo, la dirección del campo en este plano puede mantenerse fija o cambiar. En general, las fuentes de luz producen luz despolarizada. Ello significa que la dirección del campo eléctrico ( $\vec{E}_0$ ) cambia al azar de un instante a otro, tal como se indica en la figura 1(a), donde se han dibujado algunos vectores orientados al azar en diferentes instantes de tiempo. La luz proveniente del sol, o la que producen las bombillas de incandescencia o los fluorescentes, está despolarizada.

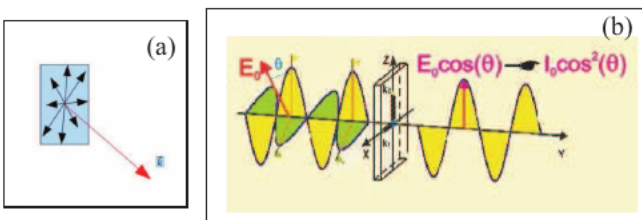


Figura 1: (a) Representación de la vibración del vector campo eléctrico de la luz despolarizada. (b) Representación de la transmisión de un polarizador lineal.

Se puede conseguir que el campo eléctrico de la onda mantenga una dirección fija en un plano. En este caso se dice que el haz de luz está linealmente polarizado. Existen diversas maneras de conseguir esto, y una de ellas consiste en hacer pasar un haz de luz despolarizado a través de un material especial que denominamos polarizador lineal. Este material transmite la componente del campo eléctrico de la onda que vibra paralelamente a una dirección privilegiada del material, que se denomina eje de transmisión del polarizador, y absorbe el campo que vibra en la dirección perpendicular a dicho eje. Por tanto a la **salida del polarizador** tendremos luz **linealmente polarizada en la dirección del eje de transmisión del polarizador**. En la figura 1(b) se muestra un ejemplo, supongamos que el campo eléctrico ( $\vec{E}_0$ ) del haz incidente forma un ángulo ( $\theta$ ) con la vertical y que el material polarizador tiene su eje de transmisión en la dirección vertical. El material polarizador solo dejará pasar la proyección del campo incidente en la dirección del eje del polarizador, esto es, ( $E_0 \cos(\theta)$ ). Y por tanto la irradiancia a la salida del polarizador vendrá dada por:

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

donde ( $I_0$ ) es la irradiancia del haz que incide sobre el material polarizador. Esta expresión es conocida como la **ley de Malus**, que proporciona el grado de atenuación del haz que emerge de un polarizador.

Si aplicamos esta idea al caso de un haz incidente despolarizado, el vector eléctrico ( $\vec{E}_0$ ) formará un ángulo ( $\theta(t)$ ) con el eje que irá cambiando al azar. Por lo tanto, en la irradiancia del haz transmitido tendremos que promediar todos los posibles valores que tomará el coseno al cuadrado del ángulo. Dicho promedio es  $1/2$ , es decir, la irradiancia transmitida resulta ser ( $I = I_0 / 2$ ).

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos establecer un procedimiento para atenuar un haz de luz despolarizada empleando sucesivamente dos polarizadores: el primero de ellos permite atenuar la irradiancia en un factor  $1/2$  y si colocamos un segundo polarizador con su eje formando un cierto ángulo con el eje del primero, podemos variar a voluntad la irradiancia transmitida por el sistema formado por los dos polarizadores. Así obtenemos entonces un filtro de atenuación variable sin más que cambiar el ángulo relativo entre los ejes de transmisión de los dos polarizadores.

### Análisis de polarizadores y Ley de Malus

El siguiente vídeo muestra el procedimiento para analizar el efecto de una lámina polarizadora en la luz así como el procedimiento para comprobar experimentalmente la ley de Malus anteriormente expuesta. Para ello, además de las dos pequeñas láminas polarizadoras, será necesario disponer de:

- Un transportador de ángulos o similar. En el siguiente documento se facilita una plantilla igual que la que se presenta en el vídeo para poder ser impresa y realizar la experiencia.
- Una aplicación para el móvil que nos permita acceder a los valores que mide el sensor de luz. Hay muchas aplicaciones y cualquiera es válida. Para dispositivos Android, algunas de estas aplicaciones podrían ser [Phyphox](#) o [Light Meter Pro](#) (Nota: Estos enlaces se proporcionan únicamente como ejemplos de aplicaciones para realizar la experiencia casera. Los autores de este documento no tienen ningún tipo de relación con los creadores de estas aplicaciones).

0:00

Una vez medidos los valores de la irradiancia en función del ángulo formado por los ejes de transmisión de los dos polarizadores, podemos realizar un ajuste lineal de los datos y así comprobar la ley de Malus. Para ello debemos representar las dos magnitudes que son proporcionales según la ley de Malus, es decir, la irradiancia y el coseno al cuadrado del ángulo. El ajuste lineal se puede realizar con cualquier programa de cálculo o usando la aplicación desarrollada para Android que se puede descargar del enlace [https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai\\_oscar\\_gomezcalderon.AjusteLineal\\_ShaDB&hl=es&gl=US&pli=1](https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_oscar_gomezcalderon.AjusteLineal_ShaDB&hl=es&gl=US&pli=1)

## EXPERIENCIA CASERA 3

### Medios anisótropos

Para realizar esta experiencia es necesario disponer de dos pequeñas láminas polarizadoras que se pueden comprar en muchos establecimientos. A modo de ejemplo el [siguiente enlace](#) lleva a la tienda de Amazon donde aparecen diferentes propuestas de láminas polarizadoras. NOTA: Los autores no tienen ninguna relación con Amazon y únicamente se proporciona dicho enlace con el fin de facilitar la búsqueda de las láminas.

#### Introducción

Los medios materiales se pueden comportar de forma isotrópica o anisótropa al paso de la luz. En el primer caso, las propiedades ópticas del medio son las mismas en todas las direcciones del espacio y su índice de refracción es el mismo en todos los puntos del material, mientras que en el segundo caso, el índice de refracción del material es diferente en cada punto del material y varía con la dirección de propagación de la luz dentro de ellos. Los materiales anisótropos denominados birrefringentes se caracterizan por poseer sólo dos índices de refracción diferentes en dos direcciones perpendiculares, por ejemplo  $n_x = n_y$  y  $n_z$ . Un ejemplo de estos materiales se puede obtener cortando adecuadamente el cristal de calcita. También existen moléculas birrefringentes de por sí, donde la carga se distribuye en forma de elipsoide, como ocurre en la molécula de cristal líquido 5CB.

Vemos brevemente qué sucede si sobre una lámina birrefringente incide un haz de radiación que se propaga en la dirección OY y está linealmente polarizado con dirección de vibración del campo eléctrico formando un cierto ángulo  $\theta$  con el eje Z. Podemos descomponer el vector campo eléctrico en sus componentes cartesianas,  $E_x$  y  $E_z$ . Como el medio anisótropo presenta distintos índices de refracción,  $n_x$  y  $n_z$ , en las direcciones X y Z, una componente se retrasará respecto de la otra, dado que viajan a diferentes velocidades. En esta situación las componentes del campo a la salida estarán desfasadas. El retraso temporal  $\Delta t$  entre ambas componentes será:

$$\Delta t = \frac{e}{v_z} - \frac{e}{v_x} = \frac{e}{c} \left( \frac{1}{n_z} - \frac{1}{n_x} \right)$$

siendo  $e$  el espesor de la lámina. Este retraso conlleva un corrimiento o desplazamiento espacial entre los campos que se propagan en ambas direcciones  $\Delta y = c \Delta t$ . Por lo tanto, el desfase relativo entre las dos componentes del campo al pasar a través de la lámina será:

$$\Delta \phi = k \Delta y = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{e}{n_z} - \frac{e}{n_x} \right)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación. Si la diferencia de índices  $(n_z - n_x)$  (llamada birrefringencia) es constante a lo largo de todo el material, éste se comportará como una lámina retardadora, ya que el único efecto que provoca en la luz que pasa a través suya es retrasar una componente respecto de otra, alterando con ello el estado de polarización. En general la luz quedará polarizada elípticamente. Sin embargo, para ciertos valores del desfase, podremos tener luz lineal.

### Efecto de un material birrefringente sobre el estado de polarización de un haz

El siguiente vídeo muestra el procedimiento para analizar el efecto que producen ciertos materiales anisótropos sobre la luz linealmente polarizada que incide sobre ellos. Vamos a emplear las dos láminas polarizadoras y las colocaremos de forma que sus ejes de transmisión queden perpendiculares entre sí. Entre ambas láminas polarizadoras introduciremos una lámina de material birrefringente girando lentamente dicha lámina y observando su efecto.

0:00



## Localización de las líneas neutras del material birrefringente

El siguiente vídeo muestra cómo localizar las dos direcciones privilegiadas perpendiculares entre sí (líneas neutras) que presenta la cinta adhesiva transparente (celo), en las cuales los índices de refracción del material son diferentes. Para ello se gira lentamente el trozo de celo y se observa su efecto.

0:00



## Propuesta ampliación de conceptos: Dos trozos de celo cruzados

Una vez localizadas las líneas neutras de la lámina retardadora, determinar qué sucede al superponer dos trozos de celo perpendiculares entre sí. Al pegarlos de esta manera las líneas neutras de ambos celos quedarán perpendiculares entre sí. Introducir los dos trozos de celo entre los dos polarizadores cruzados e ir girando los trozos de celo. Así comprobaréis que nunca se ven. ¿Podrías dar una explicación?

## Análisis espectral del desfase provocado por una multicapa de celo

Empleamos el espectrómetro casero para analizar el efecto de una multicapa de celo (lámina retardadora) sobre las distintas longitudes de onda del visible. El siguiente vídeo muestra como realizar el experimento.

0:00



Podemos usar un valor estimado para la birrefringencia del celo (diferencia entre sus dos índices de refracción) de 0,007. El espesor de la multicapa de celo depende del número de capas y del grosor del celo que puede depender del tipo de celo. El valor del grosor de cada capa de celo puede oscilar entre 30 y 60 micras. Así estimar teóricamente qué longitudes de onda deberían desaparecer comprobando que están aproximadamente de acuerdo con lo visto en el experimento.

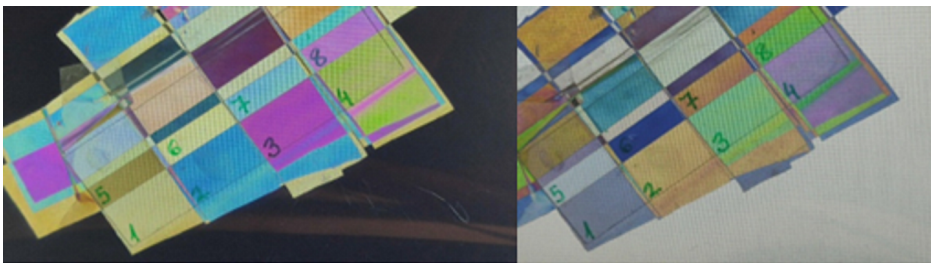
## Crear una composición artística con distintas capas de celo colocadas entre dos polarizadores

Al observar capas de celo de distinto grosor entre dos polarizadores cruzados se ven distintos colores ya que el color de la luz transmitida por el sistema será la resultante de sumar los colores que deja pasar el segundo polarizador. Para saber cuál es el color transmitido por el sistema para los distintos espesores de celo, pegamos sobre un portaobjetos distinto número de capas de celo (1, 2, 3, 4,...) y observamos el color de la luz que sale del sistema a ojo, sin necesidad de usar el espectrómetro. A modo de ejemplo en el siguiente vídeo mostramos un portaobjetos sobre el que hemos pegado una única capa de celo. Para visualizar el color transmitido por el sistema fácilmente se puede emplear como fuente de luz la pantalla del ordenador, poniendo el

fondo de pantalla blanco. En este caso no es necesario colocar el primer polarizador pues la pantalla del ordenador emite luz linealmente polarizada vertical. Pegado a la pantalla ponemos el portaobjetos con la capa de celo orientada a  $(45^\circ)$  de la dirección de polarización de la luz que sale de la pantalla, como indica el vídeo. Entre el portaobjetos que contiene la capa de celo y el ojo ponemos un polarizador cuyo eje de transmisión vamos rotando. Primero ponemos el eje del polarizador paralelo a las líneas neutras del celo de forma que no observamos ningún color transmitido por el sistema pues la luz que sale del celo está polarizada a lo largo de una de sus líneas neutras. Vamos rotando el polarizador en sentido horario hasta poner su eje de transmisión paralelo a la dirección de polarización de la luz que sale de la pantalla del ordenador y observamos que, donde se encuentra el celo, el sistema transmite el color azul y fuera del celo el sistema transmite toda la radiación. Si ahora giramos el polarizador  $(90^\circ)$  en sentido antihorario hasta que su eje de transmisión sea perpendicular a la dirección de polarización de la luz que sale de la pantalla del ordenador, vemos que donde hay celo el color transmitido es el amarillo (complementario del color azul) y donde no hay celo vemos oscuridad.

0:00

A continuación, pegamos sobre un portaobjetos distinto número de capas de celo (1, 2, 3, 4,...) y lo colocamos entre dos polarizadores con sus ejes de transmisión cruzados (foto de la izquierda) y paralelos (foto de la derecha). Así podremos disponer de una paleta de colores para realizar nuestra composición artística. Para visualizarlo fácilmente se puede emplear como fuente de luz la pantalla del ordenador tal como hemos mostrado en el vídeo anterior. Entre el portaobjetos que contiene la multicapa de celo y el ojo ponemos un polarizador cuyo eje de transmisión sea perpendicular a la dirección de polarización de la luz que sale de la pantalla del ordenador, es decir, donde no hay celo deberíamos ver oscuridad (ver foto de la izquierda). Observamos que al girar el polarizador  $(90^\circ)$  se ven los colores complementarios (ver foto derecha).



Teniendo en cuenta lo anterior vamos a crear una composición artística de tema libre con capas de celo de distinto grosor colocado entre dos polarizadores cruzados (como en el ejemplo de la foto de la izquierda) y paralelos (como en el ejemplo de la foto de la derecha).

