

# Práctica 5: Polarización de la luz

B2 2: Arnau Mas, Alejandro Plaza

28 de marzo de 2019

**Resumen:** En esta práctica se estudian de manera cualitativa varios fenómenos que dan lugar a la polarización: el dicroísmo, la reflexión, la difusión y la birefringencia. Con el uso de polarizadores podemos comprobar si la luz está polarizada, lo que permite la observación. Finalmente, con el uso de un fotómetro se ha verificado cuantitativamente la ley de Malus.

---

## 1. Objetivos

En esta práctica se pretende estudiar el fenómeno de la polarización de la luz, —que muestra que la luz es una onda transversal—, y diversos modos de causarlo.

Se estudiará la polarización por absorción selectiva de diversos materiales, por reflexión, por dispersión Rayleigh en la luz proveniente del cielo y por birrefringencia en láminas retardadoras.

Por último se comprobará la ley de Malus para la intensidad de luz que atraviesa dos polaroides.

## 2. Polarización por dicroísmo

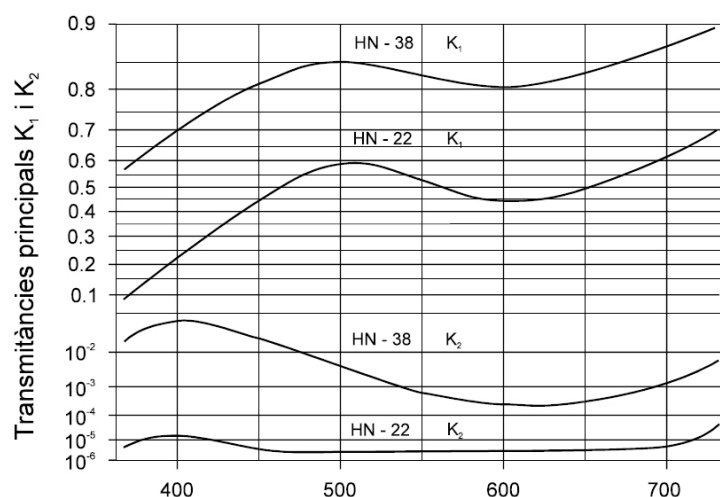
La polarización por dicroísmo tiene lugar cuando la luz atraviesa una lámina de un material que absorbe una componente y transmite la perpendicular. Normalmente estas láminas consisten en cadenas rectilíneas de moléculas que permiten a los electrones moverse en una sola dirección. Si esta dirección es la vertical, los electrones interactuarán con la componente de la onda cuyo campo eléctrico oscile en el eje vertical, pues el que oscila en el eje horizontal no puede ejercer trabajo sobre los electrones, ya que estos no se desplazan en la dirección horizontal. Así pues los electrones de la lámina absorben la componente vertical del campo eléctrico y transmiten la componente horizontal.

Se apunta a una pantalla con una fuente de luz y se coloca un polarizador HN-22 entre ambas. El resultado es una leve disminución de la intensidad de la luz que llega a la pantalla. Al girar el polarizador no se observa ningún cambio, pues se está cambiando la dirección de polarización de la luz que llega a la pantalla pero no su intensidad.

La disminución de intensidad es un indicio de que la luz se ha polarizado, pero no es una prueba, pues podría por ejemplo absorberse una fracción de la luz igual para todas

las direcciones. Para comprobar que efectivamente la luz sale polarizada se coloca entre el polaroide y la pantalla otro polaroide HN-38. al girar el segundo polaroide la intensidad va aumentando y disminuyendo. Cuando la pantalla está oscura es porque los ejes de transmisión de ambos polaroides son perpendiculares. El primer polaroide deja pasar luz únicamente en una dirección, que es justo la dirección que absorbe el segundo. Por lo tanto no llega luz a la pantalla y se ve oscura. Sin embargo, la oscuridad no es total, ya que los polarizadores no son ideales: transmiten un poco de luz en la dirección de absorción y viceversa. Este fenómeno pone en evidencia que la luz que sale de los polaroides está efectivamente polarizada.

Ahora se cambia el polaroide HN-38 por uno HN-22, de manera que los dos polaroides tienen las mismas curvas de transmitancias. Estas curvas se encuentran en la figura 2.1. En este caso cuando los ejes de transmisión son perpendiculares se ve una oscuridad más intensa porque la transmitancia del polaroide HN-22 en el eje de absorción es mucho menor que la del HN-38. La intensidad cuando los ejes son paralelos es parecida con el polaroide HN-38 y el HN-22 porque tienen transmitancias similares en el eje de transmisión.



**Figura 2.1:** Gráficas de las transmitancias principales  $K_1$  y  $K_2$  en los ejes de transmisión y absorción respectivamente de los polarizadores HN-22 y HN-38 en función de la longitud de onda.

Uno de los polarizadores tiene el eje de transmisión marcado. El eje de transmisión del otro se puede determinar girándolo hasta obtener la posición en la que la intensidad que llega a la pantalla es mínima. En este punto el eje de transmisión es el perpendicular al del otro polarizador —cuyo eje de transmisión es conocido—. Este método es más preciso que girar el polarizador hasta obtener intensidad máxima —siendo igual la dirección de transmisión de ambos polaroides— porque se determina con mayor exactitud el ángulo de intensidad mínima que la máxima.

En la figura 2.1 se ve que las transmitancias dependen de la longitud de onda. Para poner de manifiesto esta dependencia se colocan un filtro verde y otro rojo en la fuente de luz. Cuando los ejes son paralelos no se ve mucha diferencia, pero cuando son perpendiculares la luz que llega a la pantalla es menos intensa con el filtro verde que con el rojo. Si observamos la curva de  $K_1$  del HN-22 la transmitancia es similar para longitudes de onda alrededor de los 500 nm (verde) y de los 700 nm (rojo). Sin embargo  $K_2$  es bastante mayor

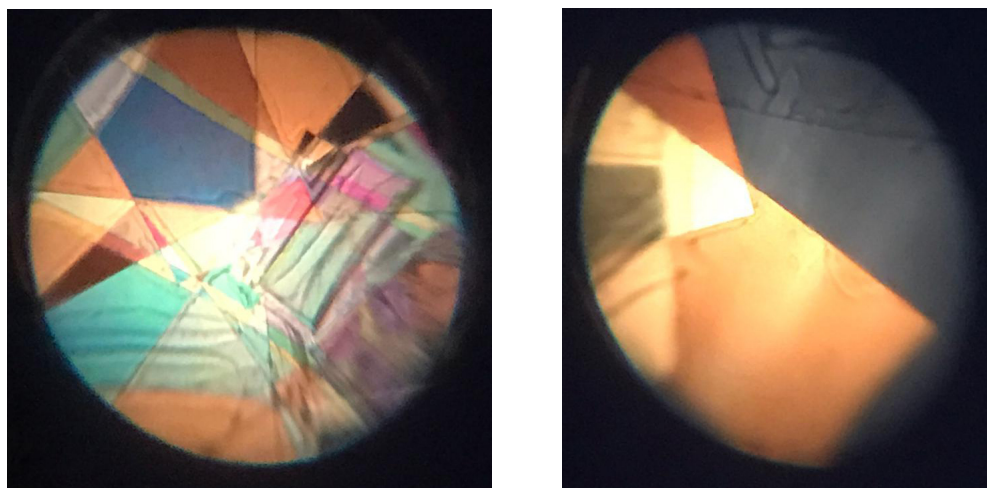
para el rojo que el verde (obsérvese que del  $10^{-1}$  hacia abajo la escala es logarítmica: pequeños cambios en el eje  $y$  son grandes cambios de transmitancia).

Ahora se disponen los polarizadores con los ejes de transmisión cruzados y se colocan objetos entre ambos polarizadores. Se coloca asimismo una lente para proyectar los objetos sobre la pantalla. Este sistema se llama polariscopio.

Si se pone una lámina de vidrio no ocurre nada. La luz sale del vidrio tal cual ha entrado. No cambia su polarización. Por lo tanto se ve oscura la pantalla. Si se pone papel, sin embargo, sí que se ve algo de luz porque la luz polarizada que llega al papel se dispersa en él y sale despolarizada. Así la luz que llega al segundo polarizador tiene una componente no nula en el eje de transmisión. Independientemente de la orientación del papel o de los polarizadores se ve la pantalla iluminada.

Cuando se pone celofán se ilumina la pantalla según el ángulo de orientación. Cuando se gira se puede conseguir que se ilumine la pantalla. Si se orienta para ver el máximo de intensidad, para que vuelva a dejar de pasar la luz se ha de girar  $90^\circ$ . Esto se explica porque el celofán cambia la orientación de la polarización de la luz, de modo que si antes llegaba la luz oscilando perpendicular al eje de transmisión del segundo polarizador, con el celofán se puede cambiar la orientación de la polarización para que la luz llegue al segundo polarizador con el campo eléctrico oscilando en la dirección de transmisión.

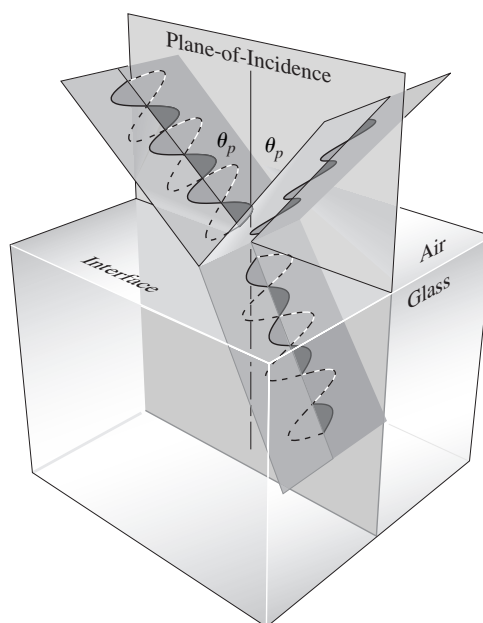
También se puso una pequeña lámina de plástico con varios trozos de cinta adhesiva simple. Se observaron los distintos trozos de diferentes colores como muestra la figura 2.2. El celo modifica la orientación de la polarización de la luz, pero no afecta todas las longitudes de onda por igual: cada una gira su polarización por separado. Por eso algunas longitudes de onda llegan paralelas al eje de transmisión proyectándose sobre la pantalla y otras llegan perpendiculares siendo absorbidas. Además cada capa modifica la polarización y por lo tanto según la cantidad de capas de cinta que haya se ve de un color u otro. Al girar el plástico se ve cómo cambian los colores.



**Figura 2.2:** Fotografías de la la pantalla con cinta adhesiva en el polariscopio.

Por último se coloca una caja de un CD, que es un plástico rígido, en el polariscopio. Se observan diversos colores en la pantalla como con la cinta adhesiva. Al presionar el plástico, los colores cambian, lo cual se puede explicar porque al sufrir esfuerzos el plástico cambia la orientación de las diversas longitudes de onda de la luz polarizada.

### 3. Polarización por reflexión



**Figura 3.1:** Polarización de un haz de luz que incide sobre un material dieléctrico en el ángulo de Brewster. Como se puede ver el haz reflejado sale polarizado perpendicular al plano de incidencia

Existe un ángulo de incidencia a través del cual la luz reflejada está linealmente polarizada. Este ángulo se conoce como el ángulo de Brewster. Para observar este fenómeno disponemos de una fuente de luz, un filtro monocromático rojo y una lente colimadora. Con estos elementos podemos producir un haz monocromático que reflejamos en una lámina de cristal. Con un polaroide HN-22 analizamos el haz reflejado variando el ángulo de incidencia en la lámina.

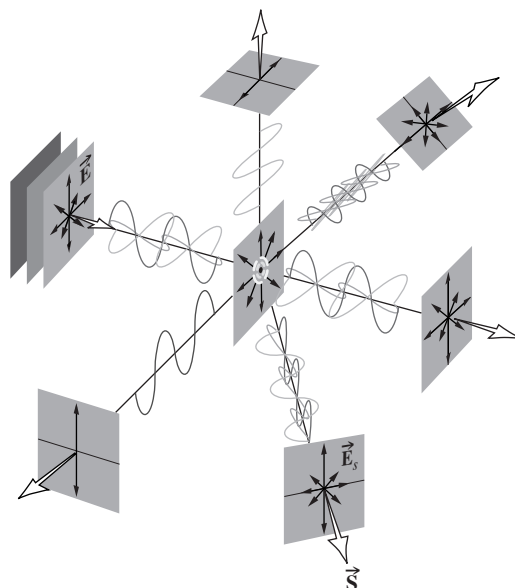
Para ángulos de incidencia pequeños observamos que la luz reflejada no está polarizada, pues al girar el polaroide no se observa una variación de la intensidad del haz reflejado. En cambio, para ángulos cercanos al ángulo de Brewster se podían observar variaciones notables de la intensidad del haz reflejado al rotar el polaroide, lo que indica que se trata de un haz polarizado.

La polarización en el ángulo de Brewster tiene la particularidad de que es perpendicular al plano óptico. Así pues, si el haz incidente está linealmente polarizado paralelo al plano óptico entonces en el ángulo de Brewster no deberíamos observar reflexión puesto que el haz original no tenía componente perpendicular al plano óptico. Efectivamente podemos observar este fenómeno si colocamos un polarizador después del filtro y lo orientamos con su eje de transmisión paralelo al plano óptico. En el ángulo de Brewster no observamos reflejo.

Sustituyendo la lámina de vidrio por una lámina metálica como elemento reflector no observamos sustanciales variaciones en la intensidad del haz reflejado al rotar el analizador. Esto nos indica que no se está dando el fenómeno de polarización en el ángulo de Brewster. El motivo es que la polarización en el ángulo de Brewster sólo se da en materiales dieléctricos, como el vidrio. No se da, en cambio, en materiales conductores como

lo es la lámina metálica.

## 4. Polarización por difusión Rayleigh



**Figura 4.1:** Emisión de un dipolo

Cuando un haz de luz linealmente polarizado incide sobre un dipolo este emite luz en todas direcciones excepto en la dirección perpendicular al haz (y por lo tanto paralela al a oscilación del campo eléctrico). Tal y como vemos en la figura 4.1, esto implica que cuando un haz no polarizado incide sobre un dipolo hay dos direcciones en las que se emite luz linealmente polarizada. Por un lado, en la dirección vertical no se emite la componente que oscila verticalmente, y en el eje horizontal no se emite la componente que oscila horizontalmente. Podemos apreciar este fenómeno observando la luz que proviene del sol. Puesto que el sol emite luz que no está polarizada y que esta interacciona con las moléculas de la atmósfera que se comportan como dipolos, existirán dos direcciones en las que observaremos luz polarizada.

Efectivamente, observando el cielo en la dirección ortogonal al sol con un polarizador podemos ver como la intensidad de la luz decrece cuando rotamos el polarizador. Aún así, el mínimo de intensidad no llega a ser 0 puesto que las moléculas los gases de la atmósfera no son dipolos perfectos. Cuando observamos en una dirección cercana al sol, en cambio, no apreciamos variaciones notables en la intensidad al rotar el analizador, que indica que la luz no está polarizada.

También pudimos observar la luz reflejada por el cristal una ventana y pudimos comprobar como el haz reflejado en el ángulo de Brewster está polarizado. En cambio la luz reflejada por el marco metálico no lo está, tal y como hemos explicado anteriormente.

Para ver estos fenómenos es mejor utilizar el polarizador HN-22 puesto que tiene una transmitancia principal en el plano de extinción,  $K_2$ , menor que el polarizador HN-38, tal

y como se ve en la figura 2.1.

## 5. Polarización por birefringencia

Cuando un haz de luz atraviesa un material birefringente se separa en dos rayos que se refractan de manera diferente. Estos reciben el nombre de rayo ordinario y rayo extraordinario y están polarizados linealmente y perpendiculares entre sí. Uno de los materiales con esta propiedad es la calcita. Para analizar el fenómeno observamos un objeto —en este caso un círculo negro— a través del cristal. Se observan dos imágenes, una es fija y la otra gira cuando rotamos el cristal de calcita. La primera es la debida al haz ordinario, mientras que la segunda es la debida al haz extraordinario. En los materiales birefringentes, la dirección en la que sale refractado el haz extraordinario viene determinada por el llamado eje óptico del material por lo que un material birefringente es necesariamente anisotrópico. Además con un polarizador podemos ver que los rayos están polarizados perpendicularmente pues en una orientación podemos ver sólo la imagen ordinaria y si rotamos el polarizador  $90^\circ$  vemos únicamente la imagen extraordinaria.

### 5.1. Láminas retardadoras

Las láminas retardadoras son un elemento óptico que hacen uso de la birefringencia para alterar la fase de una onda electromagnética en una dirección concreta, que denominamos el eje lento. En primer lugar hemos utilizado una lámina retardadora de  $\frac{\lambda}{4}$ . Su funcionamiento es retrasar la fase del componente paralelo a su eje un cuarto de periodo. Con esta lámina podemos conseguir luz linealmente polarizada y circularmente polarizada. Para ello en primer lugar hacemos pasar el haz por un polarizador de manera que obtenemos luz linealmente polarizada en una dirección conocida. Si el ángulo entre el polarizador y la lámina es nulo entonces la lámina no tiene efecto por lo que deberíamos observar luz linealmente polarizada al otro lado. Similarmente, si el ángulo es de  $90^\circ$  entonces la lámina retarda el haz incidente pero como originalmente estaba polarizada en una sola dirección la luz que observamos al otro lado sigue estando linealmente polarizada. Podemos comprobar esto con un analizador y verificamos que efectivamente conseguimos intensidad nula rotando el analizador.

Por otro lado, si el ángulo entre el primer polarizador y la lámina es de  $45^\circ$  entonces el campo eléctrico se descomponen en sus dos proyecciones, sobre el eje lento y el eje rápido. La proyección sobre el eje lento se retrasa un cuarto de periodo por lo que la diferencia de fase entre ambas proyecciones es de  $\frac{\pi}{2}$ . Entonces la luz que atraviesa la lámina sale circularmente polarizada. Para comprobar esto deberíamos ver como al rotar el analizador no cambia la intensidad de la luz reflejada. Puesto que es complicado obtener un ángulo relativo de exactamente  $45^\circ$  no terminamos de ver intensidad constante. Con el fotómetro medimos la intensidad en el máximo y en el mínimo y pudimos conseguir una oscilación de menos de 15 mW entre ambos.

La lámina de  $\frac{\lambda}{2}$  retrasa la proyección sobre el eje lento medio periodo. Si la orientación relativa entre el polarizador y la lámina es de  $0^\circ$  o  $90^\circ$  entonces toda la oscilación es o bien perpendicular al eje óptica o paralela a él por lo que no altera la polarización del

haz. Efectivamente podemos comprobarlo rotando el analizador de manera que si su eje está cruzado con el primer polarizador la luz no atraviesa el sistema. Si el ángulo es de  $45^\circ$  ahora introduce una diferencia de fase de  $\pi$  entre las componentes, lo que gira el eje de polarización  $90^\circ$ . También pudimos comprobar este hecho ya que al poner el analizador y el polarizador con los ejes paralelos la intensidad transmitida era prácticamente nula mientras que si estaban cruzados era máxima.

Finalmente sustituimos la lámina retardadora por una lámina de mica. Observamos que al rotar la lámina de mica aparecen colores en la imagen que se forma de ella en la pantalla. Los vemos cada  $90^\circ$ , y en medio vemos que la imagen es uniformemente blanca., y en medio vemos que la imagen es uniformemente blanca.

## 6. Verificación de la ley de Malus

A continuación verificaremos experimentalmente la ley de Malus. Esta ley da la intensidad transmitida a través de dos polarizadores en términos de su orientación relativa. Si los dos polarizadores son iguales entonces se puede demostrar que la intensidad transmitida de un haz monocromático que los atraviesa es

$$I(\theta) = K_1 K_2 I_0 + \frac{1}{2} K_1 (K_1 - 2K_2) I_0 (\cos \theta)^2$$

donde  $K_1$  y  $K_2$  son las transmitancias principales de los polarizadores. Ahora bien, si la luz incidente no es monocromática y las transmitancias del polarizador dependen de la longitud de onda entonces debemos integrar sobre la distribución espectral de la luz incidente. Supondremos, pues, que estamos tratando con un polarizador ideal, por lo que la ley de Malus se reduce a la forma más conocida:

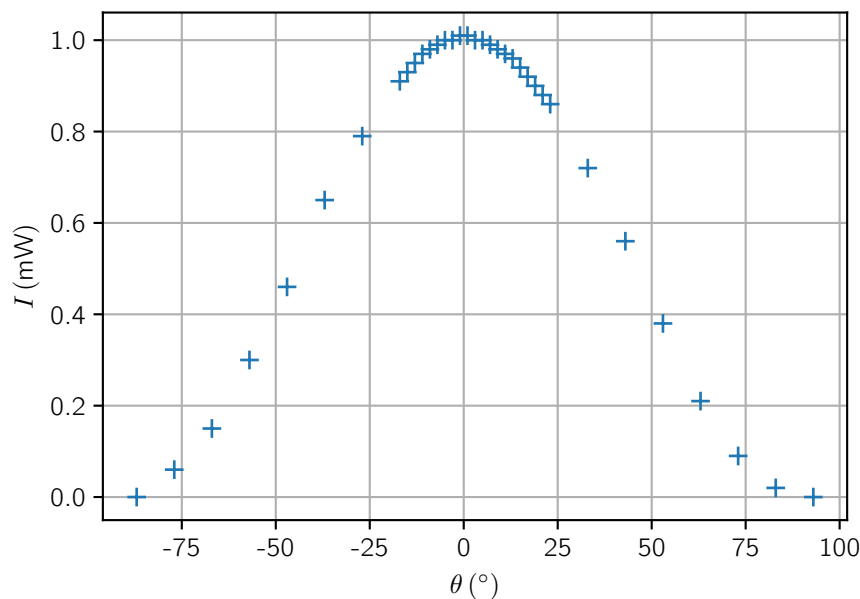
$$I(\theta) = \frac{1}{2} (\cos \theta)^2. \quad (6.1)$$

Para tomar las medidas disponemos de dos polarizadores iguales y dos lentes para colimar el haz antes y después de atravesar los polarizadores. Finalmente disponemos de un fotómetro para medir la intensidad transmitida. Para empezar a tomar medidas colocamos los polarizadores con los ejes perpendiculares de manera que la intensidad transmitida sea lo más cercana a 0 posible y fijamos el 0 del fotómetro. Aún así, el rango de ángulos en el que la lectura era inferior al umbral de tolerancia del fotómetro es considerablemente grande, por lo que es preciso corregir las medidas del ángulo a posteriori. Tomamos medidas cada  $10^\circ$  y cada  $2^\circ$  alrededor del máximo de intensidad.

En la figura 6.1 se muestran las medidas. Para determinar el ángulo relativo se tomó como origen el pico de intensidad. Las lecturas de intensidad máxima, de 1.01 mW, se dieron en  $166^\circ$  y  $168^\circ$  donde este ángulo corresponde a la lectura en el goniómetro del segundo polarizador. Así pues se tomó el origen en la media de estos valores.

Podemos ver como los datos se ajustan bien a la forma de un coseno cuadrado. Para determinar exactamente las constantes de proporcionalidad hacemos una regresión lineal de la forma

$$I(\theta) = A + B(\cos \theta)^2. \quad (6.2)$$



**Figura 6.1:** Representación de las medidas de la intensidad transmitida en función del ángulo entre los polarizadores. La incertidumbre en  $\theta$  es de  $\pm 2^\circ$ , y la de  $I$  es de  $\pm 0.01$  mW por lo que no se pueden apreciar en el gráfico.

Con la función `linregress` del módulo SciPy obtenemos unos valores para los parámetros de

$$\begin{aligned} A &= (0.004 \pm 0.002) \text{ mW} \\ B &= (1.002 \pm 0.003) \text{ mW} \end{aligned} \quad (6.3)$$

y un coeficiente de correlación  $r^2 = 0.9997$ . El ajuste está representado en la figura 6.2.

Vemos que  $A$  es a efectos prácticos 0. Esto no debería de sorprendernos puesto que ajustamos el zero de fotómetro de forma que coincidiese con la mínima intensidad leída. No significa, pues, que los polarizadores sean perfectos. De todos modos, nos interesa verificar la relación  $I \propto (\cos \theta)^2$  por lo que el valor de  $A$  no resulta especialmente relevante.

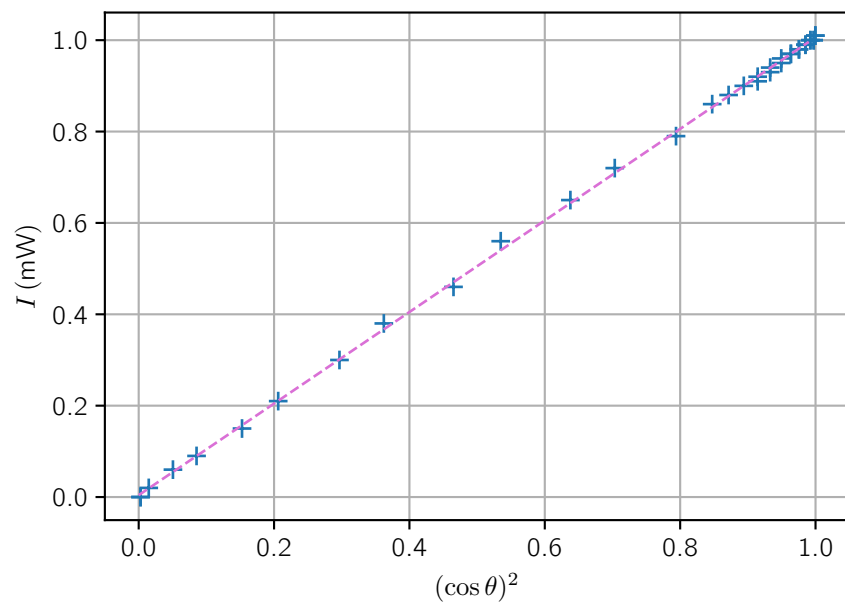
En la figura 6.3 están representado los puntos experimentales junto con la curva de intensidad teórica utilizando los parámetros estimados. Vemos que se ajusta muy bien a los datos, tal y como predice la ley de Malus.

## 7. Conclusiones

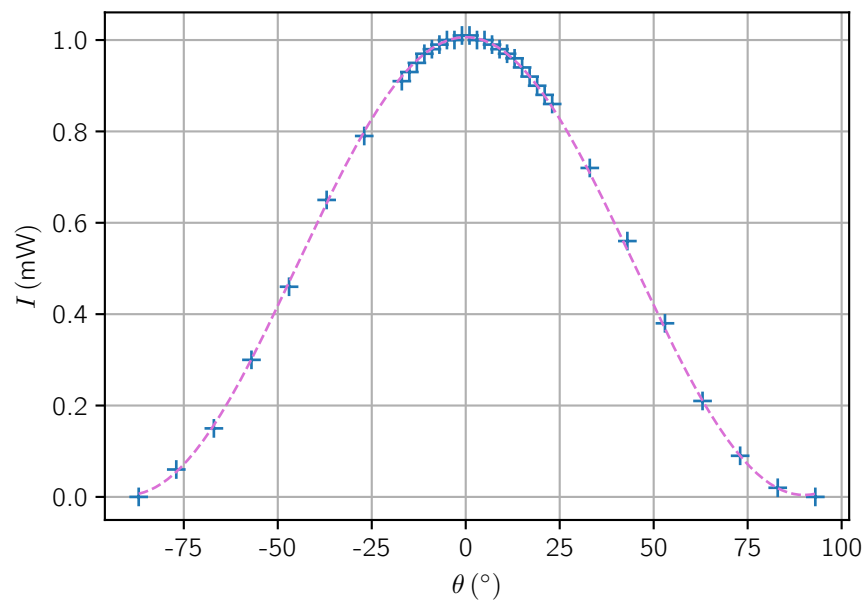
En esta práctica hemos podido comprobar que la polarización aparece como consecuencia de distintos fenómenos ópticos como son el difracción, la reflexión, la dispersión y la birefringencia. Con el uso de polarizadores podemos determinar de manera sencilla si la luz está polarizada por lo que hemos podido observar la polarización en todos estos fenómenos.

Con el uso de un fotómetro hemos tomado medidas cuantitativas con el fin de verificar la ley de Malus. Como hemos podido comprobar, las medidas se ajustan muy bien a lo que predice la teoría.





**Figura 6.2:** Representación del ajuste lineal entre la intensidad y  $(\cos \theta)^2$



**Figura 6.3:** Representación de las medidas de la intensidad transmitida en función del ángulo entre los polarizadores junto con la curva de intensidad teórica utilizando los parámetros estimados,  $I(\theta) = A + B(\cos \theta)^2$