

# Polarització de la llum. Llei de Malus.

## 1 Objectiu

Estudi qualitatiu de diversos fenòmens de polarització de la llum. Verificació de la Llei de Malus.

## 2 Material

Dos bancs òptics, font de llum blanca, làser d' He-Ne, dos polaritzadors en suports giratoris, fotocèl·lula de seleni, microamperímetre, plataforma amb goniòmetre, làmina de vidre, peces de plàstic, cinta adhesiva.

## 3 Fonament teòric

La llum visible constitueix una petita part de l'espectre de la radiació electromagnètica, que comprèn des de les ones de ràdio, amb longituds d'ona molt grans (fins a centenars de quilòmetres), fins als raigs X o els raigs gamma, amb longituds d'ona inferiors a un nanometre. En tots aquests casos té lloc la propagació per l'espai d'un camp elèctric i un camp magnètic perpendiculars entre ells i perpendiculars també a la direcció de propagació de l'ona, tal com es mostra en la Figura 1. Les ones electromagnètiques són, doncs, ones transversals.

Si la vibració del camp elèctric té lloc sempre en la mateixa direcció diem que l'ona està **linealment polaritzada** (això correspon al cas de la Figura 1), aquest és el cas de la majoria d'ones generades per un sol emissor. Ara bé, si tenim un gran número d'emissors actuant independentment, es generen ones en direccions aleatòries i desfasades també aleatòriament. Aleshores l'ona resultant està constituïda per un camp elèctric que no vibra en una única direcció i s'anomena ona **no polaritzada**. Aquest és el cas de la llum que emet el sol, una bombeta de filament,...

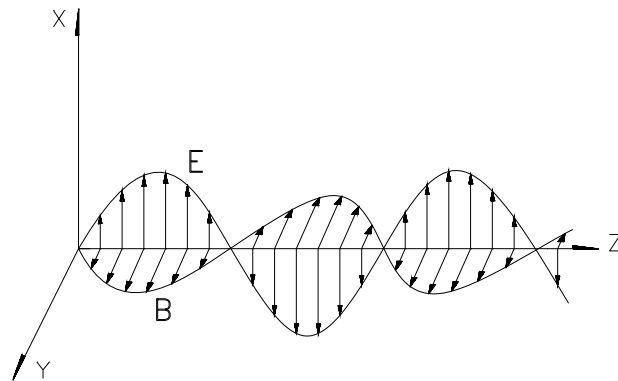


Figura 1: Ona electromagnètica.

### 3.1 Làmina polaroide

Una forma d'obtenir llum linealment polaritzada a partir de llum no polaritzada és mitjançant una làmina polaroide o polaritzador lineal dicroic. Aquesta làmina, per la seva estructura interna, absorbeix

fortament la radiació incident que vibra en una determinada direcció mentre que transmet la que vibra en la direcció perpendicular (anomenada eix de transmissió).

Quan un feix de llum no polaritzada incideix en una làmina polaroide, la llum emergent està polaritzada linealment ja que el polaritzador només transmet la component del camp elèctric paral·lela al seu **eix de transmissió**.

Si es col·loquen dos polaritzadors davant una font de llum no polaritzada de manera que els eixos de transmissió dels dos polaritzadors formin un angle,  $\theta$  (com en la Figura 2), és fàcil veure que si l'amplitud del camp elèctric que surt del primer polaritzador és  $E_o$ , en travessar el segon polaritzador, passa a ser  $E = E_o \cos(\theta)$ . Com que la intensitat  $I$  d'una ona és proporcional a  $E^2$ , es pot expressar la intensitat transmesa pel segon polaritzador com:

$$I = I_o \cos^2(\theta) \quad (1)$$

on  $I_o$  és la intensitat de l'ona incident sobre el segon polaritzador. Aquesta equació es coneix amb el nom de **Llei de Malus** i al segon polaritzador se l'acostuma a anomenar analitzador.

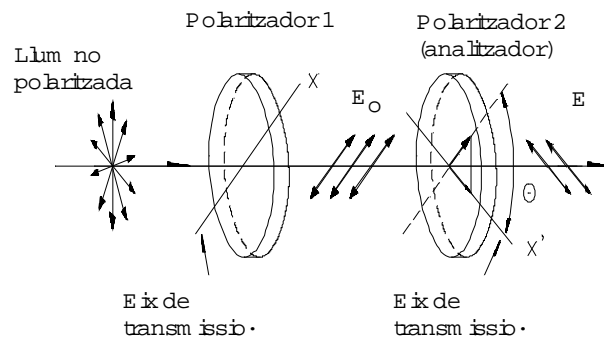


Figura 2: El primer polaritzador només transmet la radiació que oscil·la en direcció del seu eix de transmissió, així s'obté llum linealment polaritzada a partir de llum no polaritzada. El segon polaritzador només deixa passar la component del camp elèctric en la direcció del seu eix de transmissió.

### 3.2 Polarització per reflexió

Quan un feix de llum incideix sobre una superfície plana que separa dos medis dielèctrics (aïllants) part del feix es reflecteix formant un angle  $\theta_1$  amb la **normal** (direcció perpendicular a la superfície de separació) i part es transmet o refracta. L'angle que forma el raig refractat amb la normal  $\theta_2$  es relaciona amb  $\theta_1$  i els índex de refracció del primer i segon medi,  $n_1$  i  $n_2$ , per la relació:  $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$ , relació coneguda com la **Llei de Snell**.

D'altra banda, segons les lleis de la reflexió i refracció el feix incident, el reflectit, el refractat i la normal es troben continguts en un mateix pla, perpendicular al pla de separació dels dos medis, anomenat **pla d'incidència**.

Es pot demostrar que malgrat que el feix incident estigui format per llum no polaritzada, el grau de polarització del feix reflectit depèn de l'angle d'incidència i els índex de refracció. Així, el grau de polarització de la llum reflectida és màxim quan el raig reflectit i el refractat formen un angle de  $90^\circ$ . En aquesta situació, representada en la Figura 3, l'angle d'incidència, anomenat **angle de Brewster**, verifica la relació:

$$\text{tg}(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Per aquest angle la component del camp elèctric que vibra en el pla d'incidència no es reflecteix, només la que vibra en la direcció perpendicular al pla d'incidència és reflectida. Així, encara que la llum incident no estigui polaritzada, la llum reflectida en l'angle de Brewster està linealment polaritzada i la direcció de polarització és perpendicular al pla d'incidència.

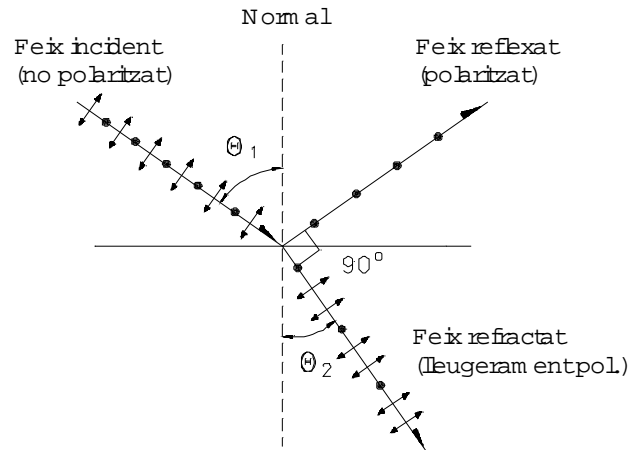


Figura 3: Polarització de la llum per reflexió. El pla d'incidència està contingut en el paper i la llum reflectida està polaritzada en direcció perpendicular.

### 3.3 Birefringència

Quan les propietats físiques d'un material depenen de la direcció, es diu que el material és anisòtrop. En alguns materials anisòtrops, la llum viatja a diferent velocitat segons quina sigui la seva polarització i direcció de propagació. Aquests materials s'anomenen materials **birefringents**. Existeix, però, una direcció per la qual totes les ones es propaguen a la mateixa velocitat anomenada eix òptic del material.

Si es fa incidir normalment (en la direcció de la normal) un feix de llum polaritzada linealment sobre una placa birefringent, les ones electromagnètiques que es propaguen per la làmina viatgen a diferent velocitat segons si el seu camp elèctric oscil·la perpendicularment al pla definit per la direcció de propagació i l'eix òptic (feix ordinari) o si està contingut en aquest pla (feix extraordinari). En general, part del feix viatja en la direcció ordinària i part en la extraordinària, de manera que, a la sortida de la làmina hi ha un desfasament entre les dues ones. A més, aquest desfasament depèn de la longitud d'ona; així, en el cas d'incidència amb llum blanca, la làmina introdueix un desfasament diferent per cada color que la compon.

Molts materials són birefringents quan se sotmeten a tensions (ja que els enllaços atòmics s'estiren en una determinada direcció i el material esdevé anisòtrop). Aquest fenomen té una rellevància especial per a l'estudi d'estructures mecàniques. Un petit model, construït a escala, de plàstic transparent, col·locat entre dos polaritzadors creuats (de manera que els seus eixos formin  $90^\circ$ ), permet visualitzar les tensions internes en diferents zones mitjançant franges de diferents colors corresponents a les longituds d'ona que sofreixen un canvi en el pla de polarització i aconsegueixen passar a través de l'analitzador (segon polaritzador).

## 4 Mètode experimental

Aquesta pràctica consta de dos muntatges en dos bancs òptics diferents: l'estudi dels efectes de les làmines polaroides, la verificació de la llei de Malus i l'estudi de la birefringència es realitzen en el banc que té la

font de llum blanca; mentre que l'angle de Brewster del vidre es determina en el banc on hi ha el làser d'He-Ne. Els polaritzadors que s'utilitzen en els dos muntatges són, però, els mateixos.

Els eixos de transmissió dels polaritzadors són verticals quan marquen  $0^\circ$ .

#### 4.1 Efectes de les làmines polaroids

Encén la font de llum i observa-la a través de polaritzador tot girant-lo. Determina si hi ha alguna dependència de la intensitat en la posició del polaritzador. Determina si es tracta de llum polaritzada o no.

Observa, ara, la llum emergent del primer polaritzador a través del segon polaritzador o analitzador. Analitza la dependència de la intensitat de llum transmesa en funció de la orientació relativa dels dos polaritzadors.

#### 4.2 Verificació de la Llei de Malus

Col·loca el detector (cèl·lula fotoelèctrica de seleni), connectat al microamperímetre, després de l'analitzador (segon polaritzador). La intensitat de corrent elèctrica que circula per la fotocèl·lula és proporcional a la intensitat lluminosa que hi incideix.

**ALERTA: No il·lumineu la fotocèl·lula directament amb la bombeta! Podríeu fer malbé la fotocèl·lula.**

Col·loca els dos polaritzadors amb els seus eixos paral·lels. Ajusta la posició de la fotocèl·lula de manera que la lectura del microamperímetre sigui màxima.

Ves girant el segon polaritzador, l'analitzador, de cinc en cinc graus i anota, en cada cas la intensitat lluminosa transmesa, en unitats arbitràries. Pren mesures fins que els eixos de transmissió dels polaritzadors siguin perpendiculars, (polaritzadors creuats).

#### 4.3 Angle de Brewster

En aquest apartat es treballa en el banc on hi ha el làser d'He-Ne.

Pren un polaritzador de l'altre banc i col·loca'l entre el làser i la plataforma. Gira el polaritzador fins que marqui  $90^\circ$ . En aquest cas la polarització de la llum que passa a través del polaritzador està continguda en pla d'incidència. Encén el làser tot girant la clau.

**ALERTA: Encara que la potència del làser sigui molt petita cal evitar que ni el feix ni cap reflexió no entri dins l'ull!! Podria causar una lesió permanent a la retina.**

Col·loca la placa de vidre vertical damunt la plataforma amb el goniòmetre (escala angular graduada) de manera que el feix del làser hi incideixi perpendicularment. Gira la làmina de cinc en cinc graus deixant el goniòmetre fix (es fixa mitjançant un cargol sota la plataforma). Amb l'ajuda d'un full de paper blanc determina qualitativament la intensitat del feix reflectit. Ves girant la làmina tot seguint el feix reflectit amb el paper blanc i busca si hi ha algun angle pel qual la reflexió s'anul·la completament. Anota l'angle d'incidència pel qual s'anul·la la reflexió, que, en aquest cas, és l'angle de Brewster,  $\theta_B$ . Recorda que l'angle d'incidència és l'angle que formen el feix incident i la normal.

Repeteix l'experiència, però, en aquest cas, col·loca el polaritzador a  $90^\circ$ , de manera que la polarització de la llum que incideix en el vidre sigui perpendicular al pla d'incidència. Mira si hi ha algun angle pel qual s'anul·la la reflexió.

Apaga el làser tot girant la clau.

Agafa, ara, el polaritzador amb la mà i analitza la llum reflectida damunt la taula, damunt alguna finestra o vidre i el terra, tot fent girar el polaritzador (observa la reflexió dels fluorescents del laboratori o bé de la font de llum blanca, o bé alguna imatge reflectida en algun vidre). Procura que l'angle d'incidència sigui proper a l'angle de Brewster. Finalment analitza també amb el polaritzador la reflexió en una placa metàl·lica.

Anota els resultats obtinguts.

## 4.4 Birefringència

Col·loca els dos polaritzadors creuats (de manera que els seus eixos formin  $90^\circ$  en el primer banc òptic, amb espai suficient per interposar diferents materials entre ells. Aquest dispositiu s'anomena **polariscopi**.

Col·loca entre els polaritzadors els següents materials: vidre, cinta adhesiva (enganxada en una placa de vidre), peces de plàstic amb tensions internes (regla) i peces de plàstic sotmeses a tensions externes (aplica lleugeres tensions als materials).

En tots els casos estudia els canvis observats en mirar a través de l'analitzador, en girar-lo, així com en canviar l'orientació del material.

Anota els resultats obtinguts.

## 5 Resultats

### 5.1 Efectes de les làmines polaroides

- Justifica si la font de llum del laboratori està polaritzada o no.
- Explica justificadament què s'observa a través de l'analitzador.

### 5.2 Verificació de la Llei de Malus

- Construeix una taula amb l'angle girat,  $\theta$ , de l'analitzador, el  $\cos^2(\theta)$  i la intensitat transmesa.
- Representa gràficament la intensitat en funció del  $\cos^2(\theta)$  i realitza la corresponent regressió lineal.
- **Comenta raonadament si es verifica la Llei de Malus.**

### 5.3 Angle de Brewster

- Explica (millor amb un dibuix) per quina de les dues polaritzacions existeix un angle pel qual la llum reflectida s'anul·la.
- Determina l'angle de Brewster i fes una aproximació del valor de l'índex de refracció del vidre,  $n_2$  tot utilitzant l'expressió 2. Recorda que, per l'aire,  $n_1 = 1$ .
- **Comenta raonadament el que has observat tot analitzant la reflexió de la llum en la taula, vidre, terra, placa metàl·lica,...**

### 5.4 Birefringència

- Descriu detalladament el què s'observa en col·locar els diferents materials en el polariscopi.

## 6 Qüestions

1. Els filtres dels polaritzadors que utilitzen els fotògrafs permeten, de vegades, evitar reflexions de la llum o bé potencialr-les. ¿Com creus que ho aconsegueixen?
2. En l'experiència de la verificació de la llei de Malus justifica perquè la lectura del microamperímetre no és 0 quan els dos polaritzadors estan creuats.
3. Busca a les taules l'índex de refracció del vidre i compara'l amb el valor que has obtingut.