

SESIÓN 5:

ANÁLISIS DEL ESTADO DE POLARIZACIÓN

TRABAJO PREVIO

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- **Luz natural**

Luz con el vector eléctrico vibrando en todas las direcciones del plano perpendicular a la dirección de propagación.

- **Estados de polarización de la luz**

Son los estados obtenidos por superposición de ondas electromagnéticas luminosas de la misma frecuencia cuyos vectores eléctricos vibran en direcciones perpendiculares. Clasificación de los estados puros de polarización:

- Luz linealmente polarizada

El vector eléctrico vibrando según una única dirección. Es equivalente a superposición de dos ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores perpendiculares, desfasadas 0 o π radianes. Se adopta el convenio de cargar la fase sobre la componente y ($\Delta\Phi = \Phi_y - \Phi_x$). En la figura 5.1 se muestran una vista frontal de una luz linealmente polarizada cuya dirección de vibración forma un ángulo α con el eje x (izquierda) y una vista completa de una luz linealmente polarizada vibrando según el eje y (derecha).

Desfase 0 (vibración en 1º y 3º cuadrantes)

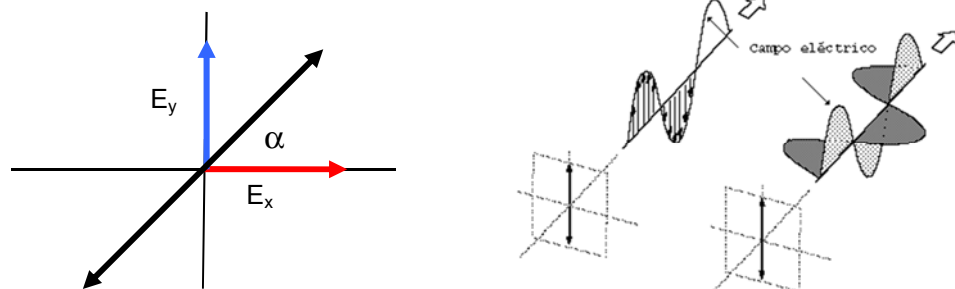


Figura 5.1. Luz linealmente polarizada.

➤ Luz elípticamente polarizada

Luz cuyo extremo del vector eléctrico describe una trayectoria elíptica. Es equivalente a la superposición de dos ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores eléctricos perpendiculares desfasados un ángulo entre 0 y π (sentido horario o *dextrógiro* de giro sobre la elipse) o entre π y 2π (sentido antihorario o *levógiro* de giro sobre la elipse). En la figura 5.2 vemos tres fases consecutivas de movimiento en vista frontal para un desfase de $\pi/2$ (izquierda) y una vista completa de una luz polarizada elíptica con desfase de $3\pi/2$ (derecha).

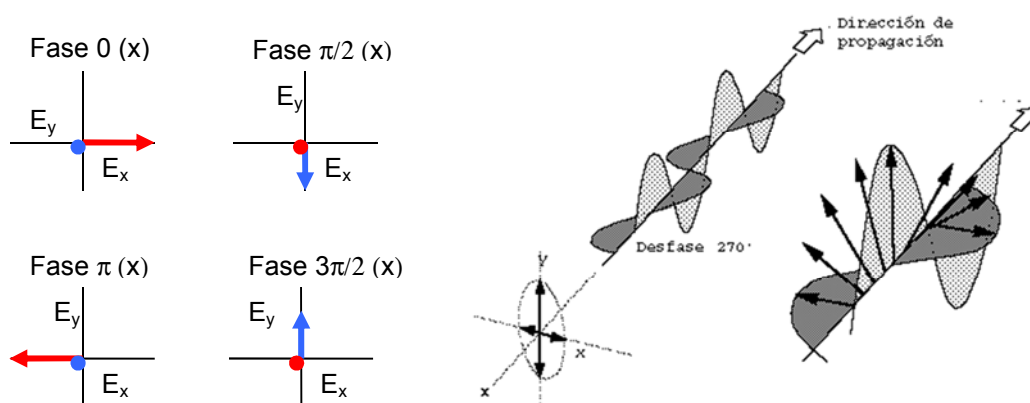


Figura 5.2. Luz elípticamente polarizada.

➤ Luz circularmente polarizada

Luz cuyo extremo del vector eléctrico describe una trayectoria circular. Es equivalente a la superposición de dos ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores eléctricos perpendiculares de igual amplitud desfasados un ángulo $\pi/2$ (sentido horario o *dextrógiro* de giro) o $3\pi/2$ (sentido antihorario o *levógiro* de giro). Aunque el desfase sea $\pi/2$ ó $3\pi/2$, la luz será polarizada elíptica si las dos componentes no tienen igual amplitud, y circular si tienen igual amplitud.

La luz puede encontrarse en estados puros de polarización o con mezcla de estados de polarización.

• **Obtención de luz polarizada: polarizadores lineales**

Los polarizadores (figura 5.3) son dispositivos que seleccionan una dirección particular de vibración de la luz sobre su *eje de transmisión*. Tras atravesarlos luz natural emerge luz linealmente polarizada en la dirección seleccionada mediante la orientación del eje de transmisión del polarizador. El eje perpendicular al de transmisión se denomina *eje de extinción*. Hay una variedad de métodos para conseguir esta selección, entre los que destacan la absorción selectiva por dicroísmo (más común), reflexión con ángulo de Brewster, o polarización por dispersión.



Figura 5.3. Polarizadores lineales.

Si sobre un polarizador lineal incide luz linealmente polarizada, la intensidad transmitida resulta:

$$I_t = I_o \cdot \cos^2 \alpha \quad (5.1)$$

donde α es el ángulo formado entre la dirección de vibración de la luz incidente y el eje de transmisión del polarizador. De la ecuación (5.1) se deduce que si colocamos dos polarizadores con sus ejes de transmisión formando 90° no habrá luz transmitida por el segundo polarizador.

Si sobre un polarizador incide luz circular o elíptica emergerá luz linealmente polarizada según el eje de transmisión.

- **Obtención de luz polarizada: láminas retardadoras**

Las láminas retardadoras (figura 5.4 izquierda) están formadas por materiales birrefringentes, generalmente medios cristalinos anisótopos. Se tallan de forma que al incidir normalmente un haz de luz a su paso por la lámina las componentes que vibran según las *líneas neutras* de la lámina emergen con un cierto desfase entre ellas, que se calcula como:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) d \quad (5.2)$$

donde Δ es la diferencia de camino óptico en el interior de la lámina entre la componente que presenta índice de refracción n_e (onda extraordinaria) y la componente que presenta índice n_o (onda ordinaria). Estos dos ejes o líneas neutras de la lámina también se denominan *eje rápido y lento*. El factor $n_e - n_o$ se denomina *birrefringencia* de la lámina (diferencia de índices de refracción entre las líneas neutras) y d es el espesor de la lámina.

En los medios anisótopos, en determinadas condiciones de incidencia de la luz (por ejemplo si el eje óptico está en el plano de incidencia y se incide formando un cierto ángulo con el mismo) se produce separación de las direcciones de vibración paralela y perpendicular al plano de incidencia (ondas ordinaria y extraordinaria) en el interior del medio, lo que ocasiona el fenómeno de la doble imagen o birrefringencia que se observa en la figura 5.4 (derecha) para un cristal de calcita.

Como se deduce de la ecuación (5.2), el desfase depende de la longitud de onda de la luz incidente. Los retardadores más habituales son las *láminas de $\lambda/4$* , que introducen un desfase de $\pi/2$ para una determinada longitud de onda. Si la luz incide vibrando según el eje óptico de la lámina (una de las líneas neutras) ésta se comporta como si fuera un medio homogéneo e isótropo con índice de refracción n_o .

La dirección de vibración perpendicular al plano de incidencia se comporta como en una refracción normal y se denomina *rayo ordinario* y la dirección de vibración paralela al plano de incidencia, que no obedece la ley de Snell para incidencia normal, se denomina *rayo extraordinario*. Los retardadores se tallan con el eje óptico perpendicular al plano de incidencia, para no producir doble imagen bajo incidencia normal. En estas condiciones, ambas componentes (ordinaria, que vibra perpendicularmente al eje óptico, y extraordinaria, que vibra según el eje óptico) obedecen la ley de la refracción de Snell al propagarse por el interior de la lámina, por lo que ésta sólo introduce desfase entre ellas y no las separa.



Figura 5.4. Láminas retardadoras (izquierda) y birrefringencia en un cristal de calcita (derecha).

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz natural, a la salida se obtiene luz natural, puesto que el desfase introducido entre las componentes ordinaria y extraordinaria no afecta al resto de direcciones de vibración de la luz incidente.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada, el resultado depende de la dirección de vibración incidente, como se resume en la tabla 5.1.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz elípticamente polarizada, el resultado emergente depende también de la orientación de los ejes de la elipse incidente, como se muestra en la tabla 5.1.

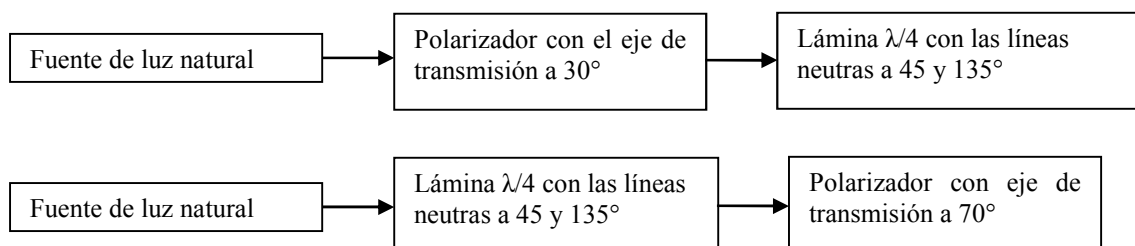
Para entender el porqué de los resultados de los estados emergentes que se muestran en la tabla 6.1 basta imaginar el efecto de introducir un desfase de $\pi/2$ entre las direcciones de vibración ordinaria y extraordinaria en cada caso. Por ejemplo, si la luz incidente vibra según una de las líneas neutras, no existe componente en la otra línea neutra en el interior de la lámina, por lo cual no se introduce ningún desfase y el estado de polarización no cambia al atravesar la lámina. Si el haz incidente es linealmente polarizado a 45° con una de las líneas neutras, al proyectar la dirección de vibración incidente sobre las líneas neutras obtenemos dos componentes de igual amplitud, y tras atravesar la lámina están desfasadas $\pi/2$ con lo que el resultado es luz circularmente polarizada.

Incidente	Resultado
Luz linealmente polarizada según una línea neutra	Luz linealmente polarizada según la misma línea neutra
Luz linealmente polarizada en cualquier otra dirección	Luz elípticamente polarizada
Luz linealmente polarizada vibrando a 45° con una de las líneas neutras	Luz circularmente polarizada
Luz elípticamente polarizada con sus ejes coincidentes con las líneas neutras	Luz linealmente polarizada
Luz elípticamente polarizada con sus ejes no coincidentes con las líneas neutras y sin formar 45° con ellas	Luz elípticamente polarizada

Tabla 5.1. Resumen de estados emergentes de una lámina $\lambda/4$.

○ CUESTIONES

- 1.- Realice un esquema similar al de la figura 5.2 (izqda.) sobre luz polarizada que refleje tres estados de fase correspondientes a la superposición de dos componentes perpendiculares de diferente amplitud desfasadas 45° , e indique el estado de polarización correspondiente.
- 2.- Calcule la intensidad emergente de un polarizador lineal si sobre él incide luz linealmente polarizada de intensidad I_1 :
 - a) Formando 50° con el eje de transmisión del polarizador.
 - b) Formando 35° con el eje de extinción del polarizador.
- 3.- Indique el estado de polarización emergente de las siguientes series de elementos:



- 4.- Si en la figura que muestra la doble imagen por birrefringencia (figura 5.4 dcha.) insertamos entre la flecha dibujada en el papel y la lámina de calcita un polarizador cuya dirección de transmisión deja pasar sólo la vibración extraordinaria, indicar qué veríamos entonces a través de la lámina de calcita. ¿Y si el polarizador transmite selectivamente la dirección de vibración ordinaria?

GUIÓN DE LA SESIÓN

○ MÉTODO GENERAL

Para determinar el estado de polarización de un haz de luz nos basta con emplear adecuadamente un analizador compuesto de dos elementos: un polarizador lineal y una lámina de $\lambda/4$.

❖ Recuerda que el analizador está compuesto únicamente por dos elementos: polarizador lineal y lámina de $\lambda/4$, que ha de seleccionar entre el material que tiene disponible. El resto de elementos que encuentre en la sesión serán para generación de luz polarizada de distintos tipos.

El procedimiento de análisis se basa en la realización secuencial de una serie de pruebas con los elementos del analizador y la deducción del estado de polarización del haz incidente según una adecuada discusión de los resultados obtenidos en las pruebas secuenciales. En esta primera parte de la práctica ha de comprender las pruebas y el diagrama de flujo mostrado en la figura 5.5, realizando algunas pruebas para obtener las referencias básicas, como por ejemplo el valor de referencia para la extinción del haz.

La primera prueba (Prueba 1) consiste en colocar el polarizador lineal del analizador tras el haz problema, y girar su eje continuamente mientras observamos el resultado mirando a través del polarizador.

La segunda prueba (que será necesaria o no dependiendo de los resultados de la primera) consiste en colocar la lámina de $\lambda/4$ tras la luz problema y tras ella el polarizador lineal. La prueba se realiza con dos variantes según los resultados de la prueba 1. La variante 2A consiste simplemente en girar el eje de transmisión del polarizador y observar lo que sucede. La variante 2B consiste en ir girando de modo independiente las líneas neutras de la lámina y el eje de transmisión del polarizador, buscando el mínimo de luz transmitida.

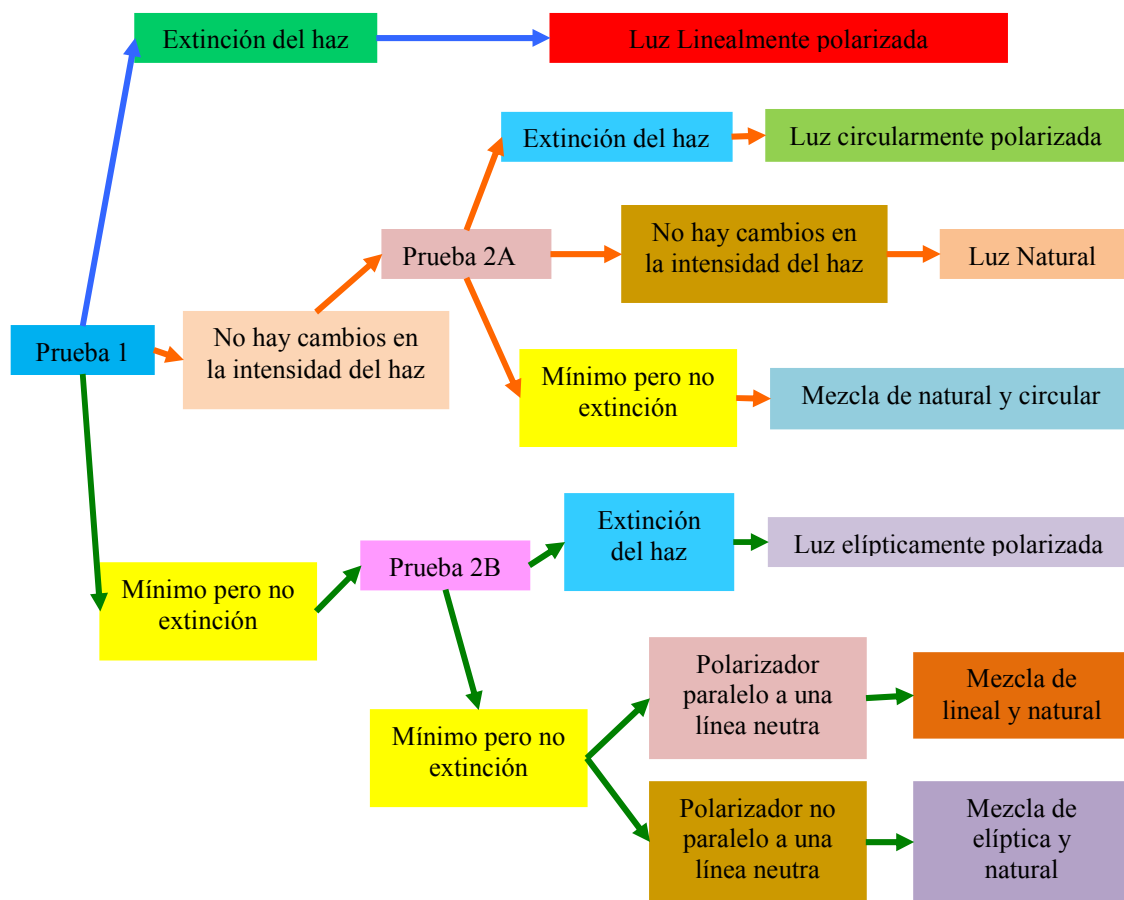


Figura 5.5. Diagrama de flujo del método general.

○ VALOR DE REFERENCIA PARA LA EXTINCIÓN DEL HAZ

Coloque los dos polarizadores y gire el eje de transmisión de uno de ellos hasta que observe un mínimo. En ese momento los polarizadores están cruzados y la intensidad de la luz a través de ellos debería de ser nula, por lo que ha de tomar como valor de cero o de referencia la intensidad que observe. Compruebe que los ejes de transmisión de los polarizados corresponden con los indicados en los mismos si indican una diferencia de 90° entre ellos.

○ DETERMINACIÓN DE LAS POSICIONES DE LAS LÍNEAS NEUTRAS DE LAS LÁMINAS

Ha de determinar las posiciones de las líneas neutras de la lámina de $\lambda/4$ del analizador y de la lámina auxiliar, pues puede suceder que no se correspondan con los ejes indicados sobre la lámina debido al prolongado tiempo de uso de las láminas en el laboratorio.

Para la determinar la posición de las líneas neutras, basta colocar la

lámina entre dos polarizadores con sus ejes de transmisión cruzados, habiendo comprobado previamente que la intensidad transmitida a través de los dos polarizadores en dicha situación corresponde a un mínimo casi nulo. Una vez situada la lámina entre los dos polarizadores, vamos girándola hasta que se observe el mínimo de intensidad transmitida (que debería ser igual que el mínimo obtenido anteriormente a través de los dos polarizadores cruzados sin lámina). En esta situación de mínimo de transmisión, las líneas neutras de la lámina coinciden con los ejes de transmisión de los polarizadores.

Se comprueba si hay diferencias con los ejes indicados por el fabricante, en cuyo caso deberán tenerse en cuenta a la hora de utilizar el analizador y la lámina auxiliar para las pruebas de determinación siguientes. Esta diferencia puede tratarla como un error de cero.

○ APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS A DISTINTOS TIPOS DE LUZ POLARIZADA.

• Luz directa de la lámpara de Sodio

Se aplica el proceso de análisis hasta determinar el estado de polarización de la luz emitida por la lámpara de Na, anotando los resultados parciales de cada una de las pruebas realizadas.

• Luz de la lámpara de Sodio a través de un polarizador

Se aplica de nuevo el proceso de análisis para comprobar que obtiene el resultado esperado de luz linealmente polarizada.

• Luz de la lámpara de Sodio a través de un polarizador tras el cual se coloca la lámina auxiliar con sus líneas neutras a 45° con el eje de transmisión del polarizador

En primer lugar determine cuál será el resultado esperado sobre el estado de polarización para este haz. A continuación aplique el proceso de análisis para comprobar si obtiene dicho resultado.

• Luz de la lámpara de Sodio a través del dispositivo problema

Si las pruebas de análisis anteriores han dado el resultado correcto, está en condiciones de determinar el estado de polarización de la luz problema.

Anote los resultados obtenidos para la luz problema.

• Luz de la lámpara de Sodio a través del dispositivo problema girado 180°

Anote los resultados obtenidos para la luz problema en este caso, y a través de este resultado y el del caso anterior deduzca la posible composición de la lámina problema.