

VI-DEC (Vídeos Didácticos de Experimentos Científicos) Física

Polarización

La propiedad de la birrefringencia es común a muchos minerales cristalinos y su estudio ha ayudado a descubrir el fenómeno de la polarización. El microscopio de luz polarizada se utiliza para determinar las propiedades ópticas, identificación de los minerales, estudio de texturas y clasificación de rocas.

Hay insectos, como las abejas o las hormigas, que se sirven de la polarización del cielo para orientarse. También se ha observado sensibilidad a la polarización en el pulpo, calamar, sepia y mantis. Por ejemplo, el cambio en la coloración de la piel de la sepia se usa para la comunicación, polarizando la luz que se refleja sobre ella.

Fundamento teórico

Introducción

La polarización sólo se produce en las ondas transversales y no en las longitudinales. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales, cuyos campos eléctricos (\mathbf{E}) y magnéticos (\mathbf{B}) oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación (en el eje \mathbf{x}) y son perpendiculares entre sí (en los ejes \mathbf{y} y \mathbf{z}) (Fig.1).

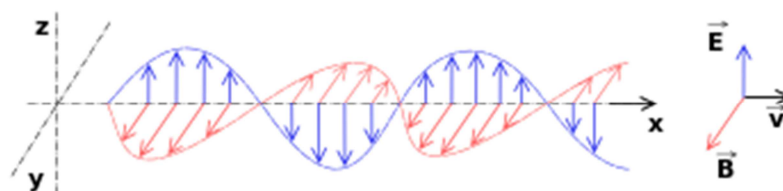


Fig.1 Onda electromagnética

Una onda luminosa se suele representar empleando solo \mathbf{E} . Si \mathbf{E} se mantiene en una cierta dirección, se dice que la onda está linealmente polarizada. La luz emitida por un solo átomo está polarizada, pero las fuentes luminosas están formadas por millones de átomos excitados, que actúan independientemente y dan lugar a la luz natural que no está polarizada: \mathbf{E} se encuentra vibrando en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación de la luz con igual probabilidad (Fig. 2). La sensibilidad del ojo es independiente del estado de polarización de la luz.

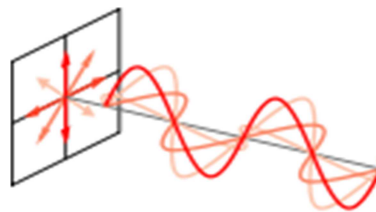


Fig.2 Onda de luz no polarizada

1. Polarización por transmisión

Los filtros polaroides están formados por largas moléculas de hidrocarburos que son estiradas e introducidas en una disolución de yodo para hacerlas conductoras. Cuando el campo eléctrico de la luz que las atraviesa tiene la dirección de las moléculas, se producen corrientes eléctricas a lo largo de ellas y la luz es absorbida. Sin embargo, un campo eléctrico perpendicular a esta dirección pasa libremente. Por tanto, un filtro polaroide o polarizador solo deja pasar los campos eléctricos que vibran en una determinada dirección, la del llamado eje de polarización y la onda del campo eléctrico se mantiene en un plano (Fig. 3).

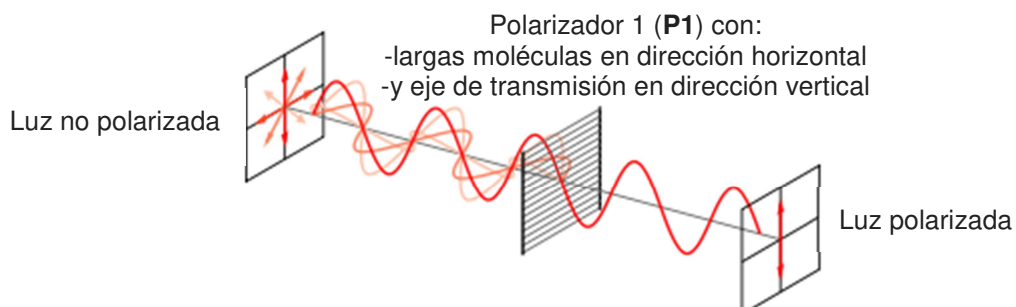


Fig.3 Producción de luz polarizada

Al girar 360° el polaroide o polarizador **P1** sobre un eje paralelo al rayo incidente de luz no polarizada de intensidad I_0 , la intensidad de luz que lo atraviesa es $I_1=I_0/2$, no varía, ya que las componentes del campo eléctrico **E₀** sobre cualquiera de los ejes **x** e **y** son iguales (Fig. 4).

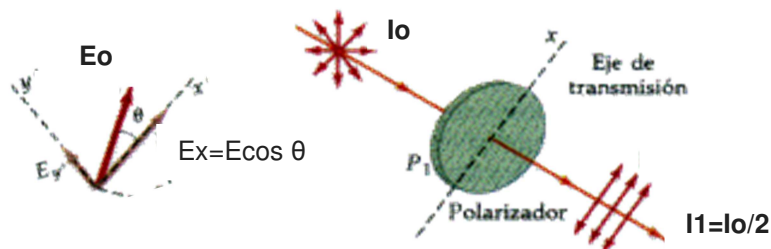


Fig.4 Descomposición del vector de campo eléctrico **E₀** en dos componentes. La mitad de la luz incidente tendrá su campo eléctrico en la dirección **y**, y la otra mitad en la dirección **x**.

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar a través de un polarizador y comprobar que la luz a través de él disminuye y es la misma al girarlo despacio 360° .

Si a continuación del primer polaroide, o polarizador **P1**, ponemos un segundo polaroide, o analizador **P2**, éste solo deja pasar la componente del campo eléctrico paralela a su eje de polarización, es decir: $E_2=E_1\cos\theta$, siendo θ el ángulo que forman los dos ejes de transmisión de ambos polaroides (Fig. 5).

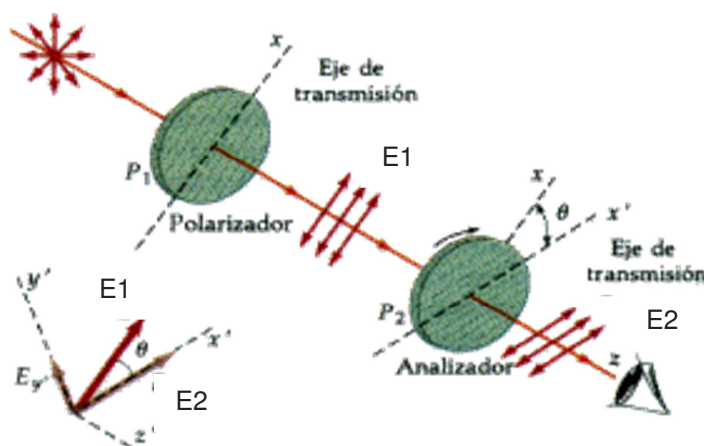


Fig.5 La luz pasa por dos polaroides cuyos ejes forman un ángulo θ entre sí.

De esta forma, si el polarizador y el analizador tienen polarizaciones paralelas la luz pasa (Fig. 6 a), y si la tienen cruzadas la luz no pasa (Fig. 6 b).

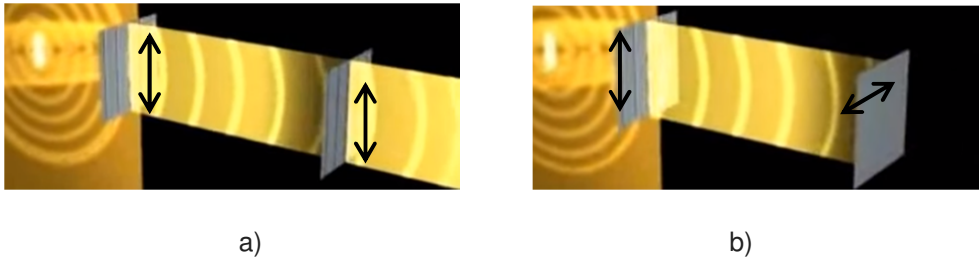


Fig. 6 La luz a) pasa cuando los dos polaroides tienen la misma dirección de polarización y b) no pasa si la tienen cruzada

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar a través de dos polaroides y girar despacio P2 respecto P1 360°. Observar que la luz transmitida a través de los dos polaroides es máxima cuando los ejes de polarización están paralelos y es mínima cuando están perpendiculares. De esta forma un polaroide sirve para analizar si la luz que le llega está polarizada y también para dejar pasar luz polarizada o eliminarla (Fig. 7). Comprobar que las pantallas de cristal líquido, como ordenadores y relojes, emiten luz polarizada.

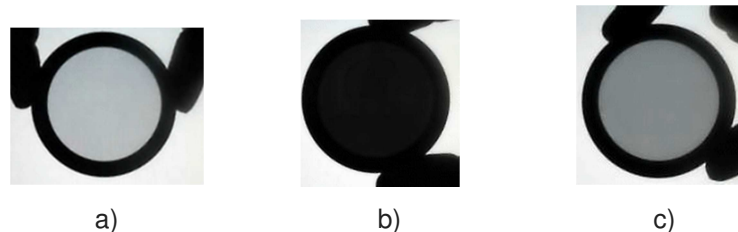


Fig. 7 La luz polarizada: a) pasa cuando su polarización coincide con el eje del polaroide, b) no pasa cuando su polarización es perpendicular al eje del polaroide y c) pasa parcialmente cuando su polarización está inclinada respecto al eje del polaroide.

1. Polarización por reflexión

La luz natural que se refleja en una superficie está parcialmente polarizada en el eje perpendicular al plano incidente. Las cargas de los átomos de la superficie son excitadas a vibrar por los campos eléctricos de la onda incidente y producen este tipo de ondas.

Cuando el ángulo incidente es θ_p es tal que el ángulo que se forma entre el reflejado y el refractado es de 90° , la luz reflejada se polariza completamente (Fig. 8). En otro caso el rayo reflejado está parcialmente polarizado

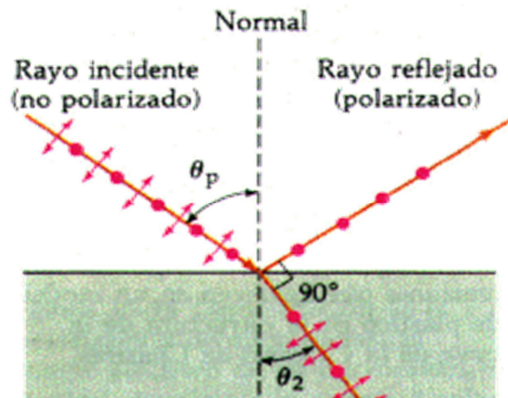


Fig.8 La luz incidente con el ángulo θ_p se refleja polarizada paralela al plano de reflexión.

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar una superficie reflectante a través de un polaroide y girarlo despacio. Se comprueba que en una posición disminuyen los reflejos, cuando el eje del polaroide es perpendicular al plano de reflexión.

Las gafas polarizadas no dejan pasar los reflejos al tener su polarización vertical, ya que la luz reflejada está polarizada horizontalmente.



2. Polarización por dispersión

El cielo es azul, las puestas de sol son rojas y la luz del cielo está polarizada. Estos fenómenos son debidos a la dispersión de la luz.

Pequeñas partículas en suspensión absorben la energía luminosa y la vuelven a radiar en todas las direcciones haciendo visible el haz de luz. Las longitudes de onda cortas (luz azul) se dispersan más que las largas (luz roja). Cuando el cielo está nublado se dispersan todos los colores y se ve blanco.

Luz no polarizada que llega a la atmósfera por el eje Z sale dispersada en el plano X-Y polarizada perpendicularmente al eje Z. (Fig. 9).

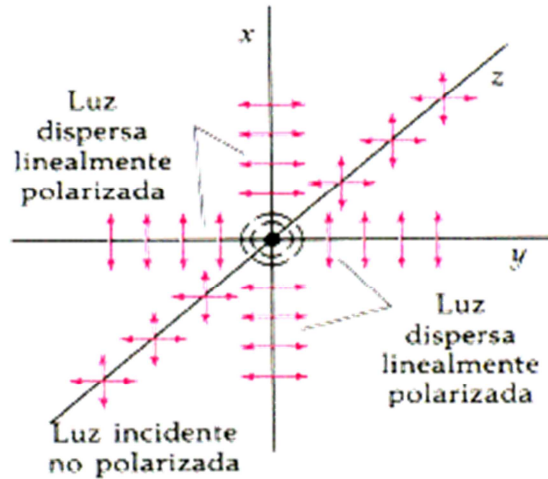


Fig. 9 Luz no polarizada que llega a la atmósfera por el eje Z sale dispersada en el plano X-Y polarizada perpendicularmente al eje Z.

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar los rayos dispersados de un haz de luz, que llega a una disolución de agua con azúcar, sin y con polaroide. Comprobar que la luz sale en todas las direcciones y que están polarizados los que salen perpendiculares al eje Z. Lo mismo sucede con la luz del cielo (Fig. 10).

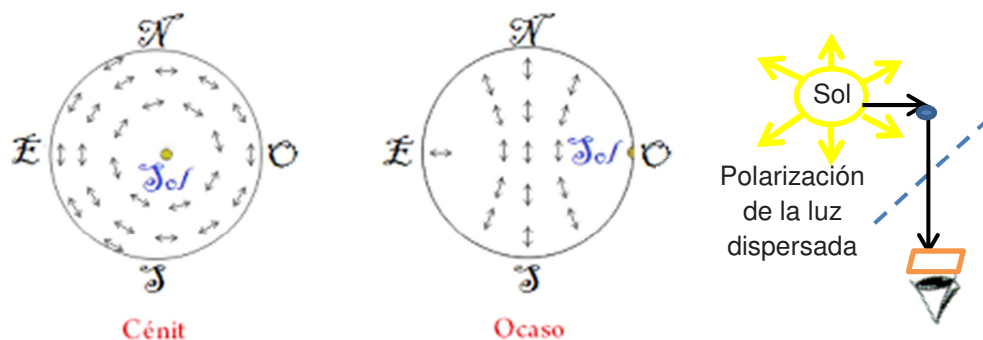


Fig.10 La luz del Sol dispersada por la atmósfera sale polarizada perpendicularmente al plano formado por la luz que llega a la partícula de dispersión y la luz que llega al ojo.

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar hacia un punto cercano al Sol a través de un polaroide y girarlo despacio para ver la polaridad de la luz.

Insectos como las abejas y las hormigas detectan la polaridad del cielo y les sirve para orientarse.

3. Actividad óptica

Algunas sustancias rotan el plano de polarización de la luz. Unas son destróginas (lo giran en el sentido de las agujas del reloj) y otras levógiras (lo giran en sentido contrario) (Fig. 11).

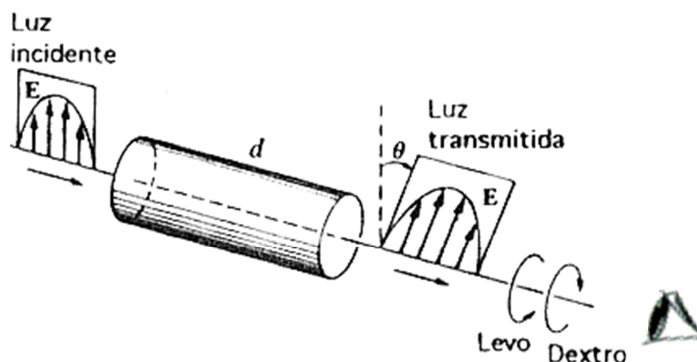


Fig. 11 El plano de polarización de la luz incidente es desviada, por una sustancia activa ópticamente destrógrira, o sea hacia la derecha cuando se mira desde la salida de rayo.

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Poner dos polarizadores cruzados y comprobar con una pantalla que no pasa luz. Poner entre los polarizadores cruzados un recipiente con una disolución de azúcar y comprobar que pasa un poco de luz. Girar el segundo polarizador un pequeño ángulo hasta que la luz que pase sea mínima.

Los aparatos que miden con precisión la actividad óptica se llaman polarímetros. Tienen muchas aplicaciones, por ejemplo, en la industria para medir la concentración de azúcares y en medicina para determinar la concentración de azúcar en sangre.

4. Polarización por birrefringencia

La birrefringencia, o doble refracción, es un fenómeno que se presenta en cristales no cúbicos como la calcita o en plásticos sometidos a tensión. Debido a su estructura atómica son anisótropos y la velocidad de la luz depende de su dirección de propagación a través del material. El rayo incidente al pasar por la calcita se separa en dos rayos, llamados ordinario **o** y extraordinario **e**, el rayo **e** se desvía más que el **o** (Fig. 12 a). Estos viajan a diferente velocidad y están polarizados perpendicularmente (Fig. 12 b). Dos rayos cruzados colocados debajo de la calcita se ven dobles (Fig. 12 c).

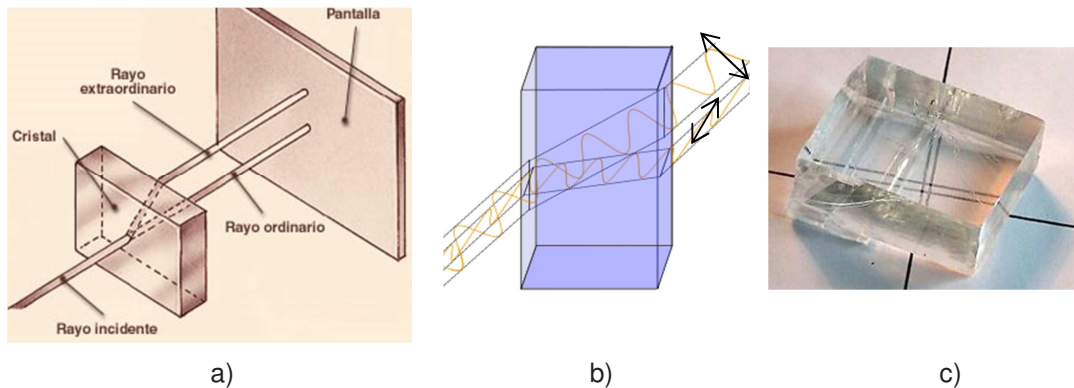
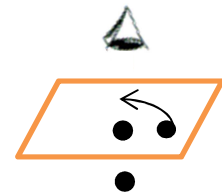


Fig. 12 a) Un rayo al incidir en la calcita se divide en dos rayos el ordinario y el extraordinario, b) perpendicularmente polarizados. c) Dos rayas cruzadas debajo de la calcita se ven dobles.

Se puede comprobar con el siguiente experimento: Hacer girar un trozo de calcita sobre 1 punto. Observar que aparecen dos puntos y que el que más se desvía **e**, gira alrededor del otro **o**.



La polarización de estos dos rayos se determina mediante un polaroide. Cuando un rayo tiene el plano de polarización paralelo al eje de polarización del polaroide pasa y si lo tiene perpendicular no pasa (Fig. 13 y 14).

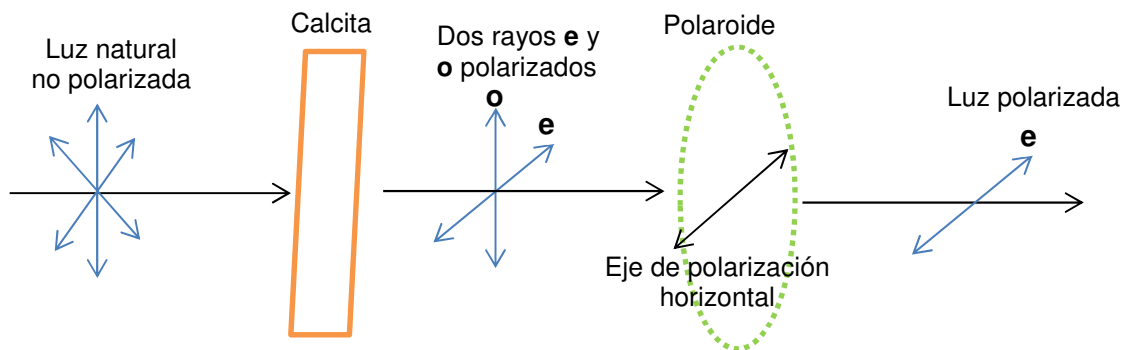


Fig. 13 El rayo **e** pasa por tener la polarización paralela a la del polaroide y el rayo **o** no pasa por tenerla perpendicular.

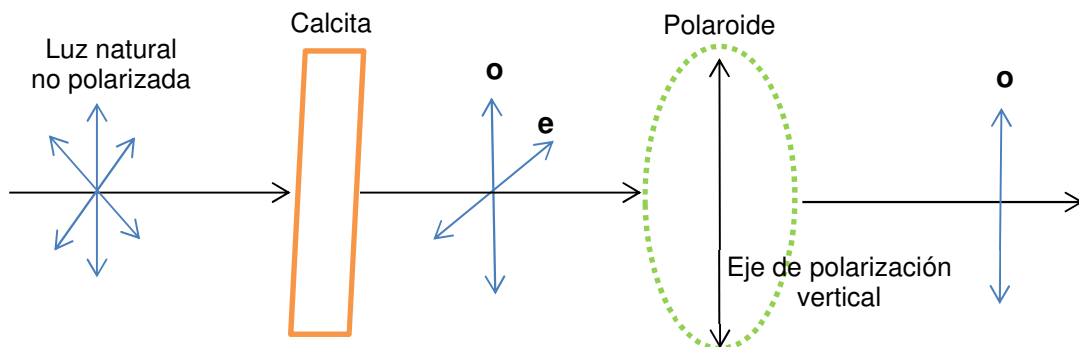


Fig. 14 El rayo **o** pasa por tener la polarización paralela a la del polaroide y el rayo **e** no pasa por tenerla perpendicular.

Si el eje de polarización del polaroide forma un ángulo de 45° con las polarizaciones de los rayos **e** y **o**, pasan las proyecciones de estos rayos sobre el eje del polaroide (Fig. 15).

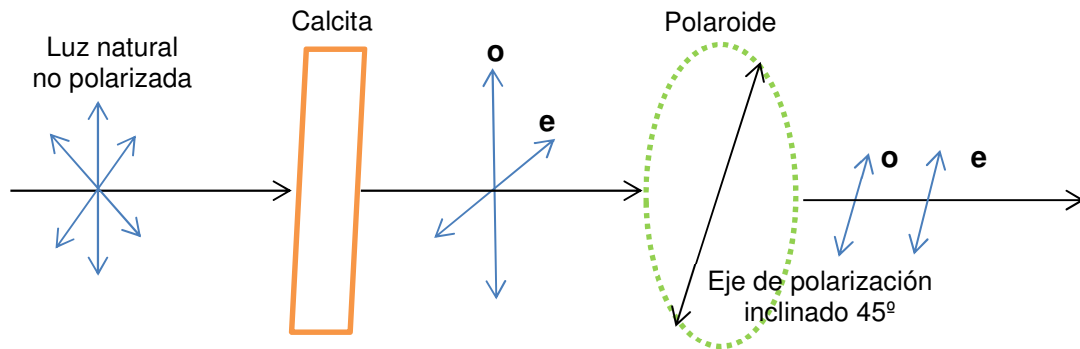


Fig. 15 Los rayos **o** y **e** pasan parcialmente al tener sus polarizaciones formando un ángulo de 45° con la del polaroide (pasan las proyecciones de **o** y **e** sobre el eje del polaroide).

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar a través de un polaroide un punto colocado debajo de un trozo de calcita y hacerlo girar. Comprobar que se observa: a) un punto (Fig. 13), b) al girarlo 90° se ve el otro punto (Fig. 14) y c) para ángulos intermedios se observan dos puntos (Fig. 15).

Si se pone el celofán con los planos de polarización de **e** (o de **o**) inclinados respecto a los ejes de dos polaroides cruzados, se ven colores. Estos colores dependen del espesor y de la inclinación con la que se mire. El rayo R1 que sale de P1 con polarización horizontal, al pasar por el celofán salen las proyecciones de R1 sobre los ejes de polarización de los rayos **e** y **o**, que al pasar por P2 salen sus proyecciones sobre el eje de P2 (Fig. 16).

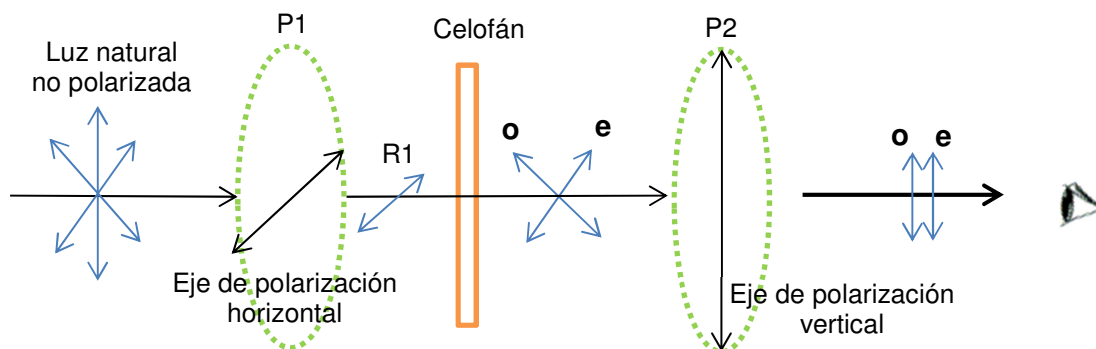


Fig. 16 Luz que atraviesa un material birrefringente entre dos polaroides cruzados

Si el eje de P2 de la Fig. 16 se pone horizontal, la luz que pasa son las componentes horizontales de **e** y **o** (Fig. 17), y se ven los colores complementarios a los que se ven en la Fig. 16. Entre ambos haces de luz forman la luz blanca que sale del celofán.

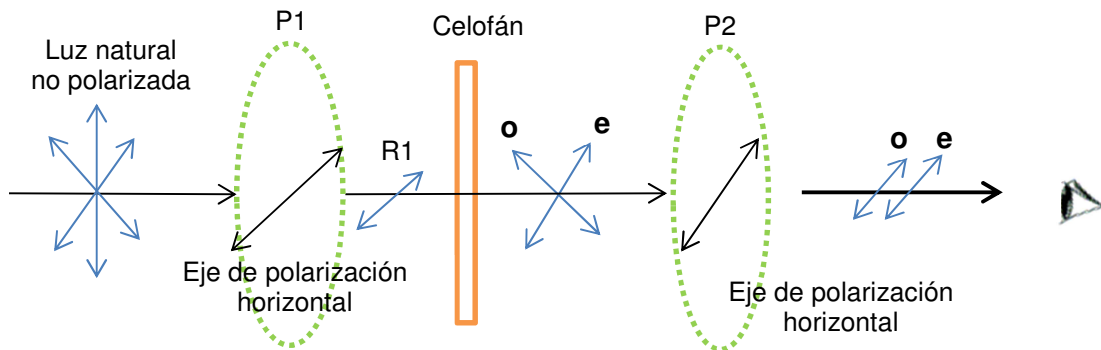


Fig. 17 Luz que atraviesa un material birrefringente entre dos polaroides con ejes paralelos

La explicación por la que se ven colores es la siguiente:

- A) La luz blanca está compuesta por los colores que se ven en el arco iris o en un prisma. También se puede obtener luz blanca por la mezcla de los siguientes colores complementarios, como son: 1) violeta y amarillo, 2) azul y naranja, y 3) verde y rojo (Fig. 18).

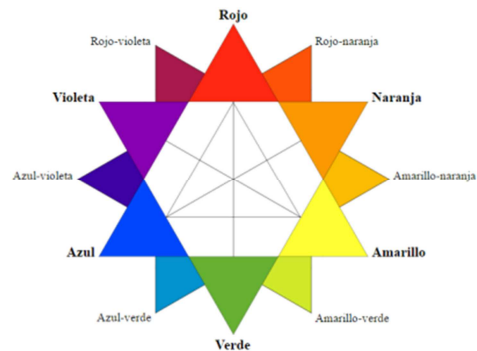
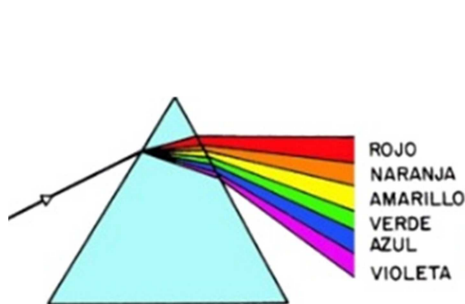
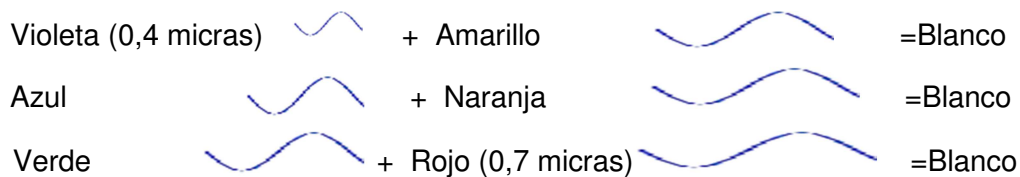


Fig. 18 a) Descomposición de la luz blanca

b) Los colores situados en posición opuesta son complementarios



c) Colores complementarios y sus longitudes de onda

- B) Los rayos **e** y **o** salen de celofán con un determinado desfase, ya que viajan a distinta velocidad ($v_e < v_o$) (Fig. 19). Esto da lugar a que se formen interferencias destructivas para algún color al pasar por P2.

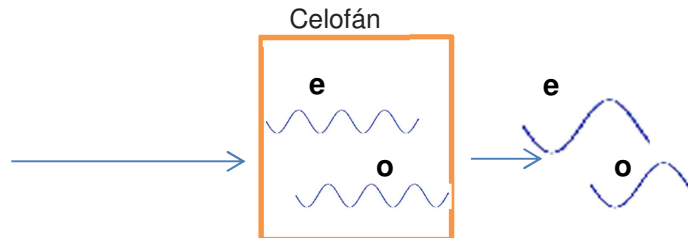


Fig. 19 Los rayos **e** y **o** viajan a distinta velocidad ($v_e < v_o$) dentro del celofán.

- C) Al inclinar el celofán de la fig. 16 y 19, la luz que lo atraviesa recorre un mayor espesor y por tanto hay mayor desfase entre **e** y **o** (Fig. 20). Esto hace que se produzcan interferencias destructivas en P2 para la luz con mayor longitud de onda y se vean diferentes colores.

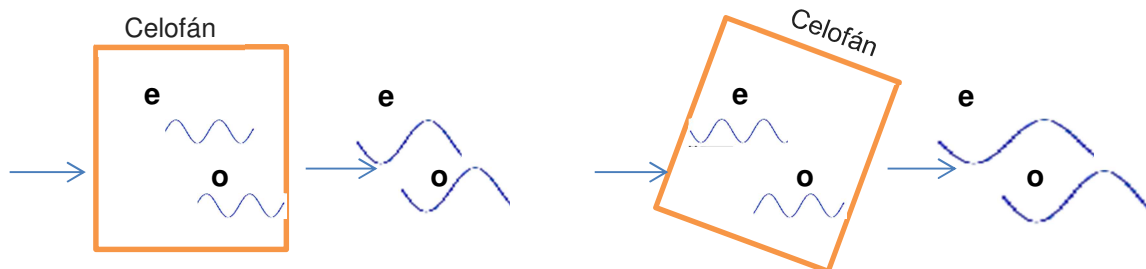


Fig. 20 La luz recorre mayor espesor al inclinar el celofán.

Se puede comprobar con los siguientes experimentos:

1º) Mirar un foco de luz con una red de difracción y ver su espectro con el color de mayor longitud de onda (rojo) más alejado del centro. Al poner un filtro naranja junto a la red de difracción desaparece el color azul (Fig. 21). Lo que indica que el filtro naranja absorbe el color azul lo que hace que se vea naranja, el color complementario al azul. El resto de los colores como también son complementarios se anulan entre sí.



a)

b)

Fig. 21 Espectro de luz blanca visto a través de una red de difracción
a) sin filtro b) con filtro naranja

2º) Al mirar distintas capas de celofán entre dos polarizadores cruzados se ven colores y éstos varían al mirar con distinta inclinación. Observar que al girar uno de ellos 90º se ven los colores complementarios. El rayo ordinario está polarizado a lo ancho de la tira y el rayo extraordinario a lo largo de su longitud (Fig. 22).

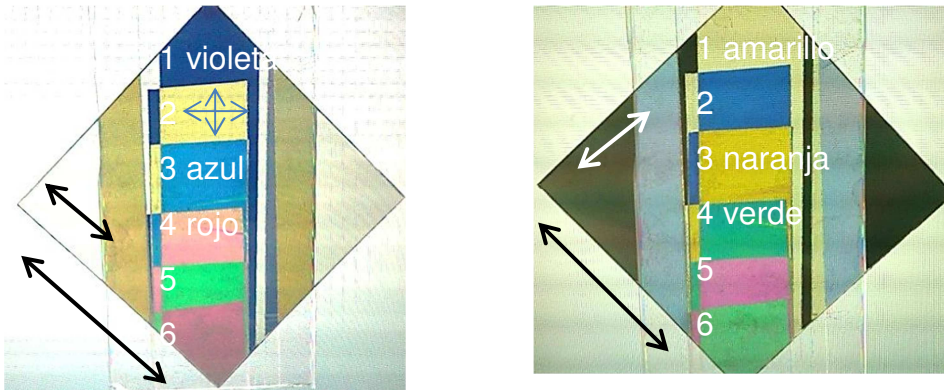


Fig. 22 Distintos espesores de celofán entre dos polaroides con los ejes paralelos y cruzados, producen unos colores en uno y los complementarios en el otro.

Haciendo determinados recortes del celofán se pueden obtener paisajes (Fig. 23).

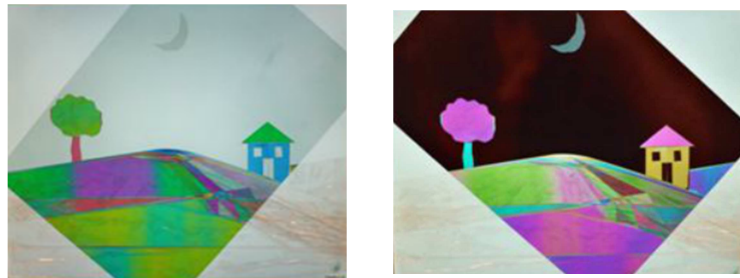


Fig. 23 Paisajes obtenidos con celofán entre dos polaroides con los ejes paralelos y cruzados, donde se ven unos colores en uno y los complementarios en el otro.

El microscopio de luz polarizada se utiliza para determinar las propiedades ópticas, identificación de los minerales, estudio de texturas y clasificación de rocas (Fig. 24).



Fig. 24 Imagen de un mineral tomada con el microscopio petrográfico.

Fotoelasticidad o análisis de esfuerzos

Las tensiones interiores en determinados materiales como los plásticos producen birrefringencia. Al colocar dichos materiales entre dos polaroides cruzados se observan bandas de colores. Estas bandas dan una descripción de la distribución de las tensiones internas que sufre la pieza. Estas tensiones son más intensas cuanto más cercanas están las bandas de colores (Fig. 25).

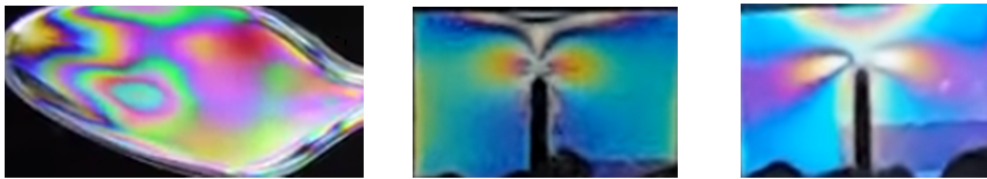


Fig. 25 Las tensiones en los plásticos aparecen en bandas de colores cuando se ponen entre dos polaroides cruzados

Se puede comprobar con el siguiente experimento:

Mirar distintos elementos de plástico entre dos polaroides cruzados y observar las bandas de colores debidas a las tensiones. Hacer esfuerzos sobre estos elementos y observar como se mueven estas bandas.

Esta información, en general, no se puede obtener por cálculos matemáticos dada la complejidad del problema. Sin embargo, puede tener mucho interés, por ejemplo, saber a qué tensiones están sometidos los huesos, las piezas de una maquinaria, los puentes al pasar un tren, etc. (Fig. 26)

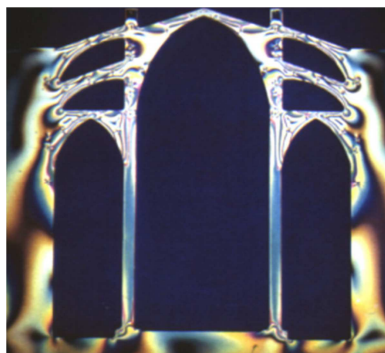


Fig. 26 Maqueta en plástico para estudiar las tensiones que sufrirá esta estructura.