

Óptica Ondulatoria

Polarización

- Fichas de trabajo de los estudiantes
- Notas para los profesores

Por W. Brauers

Traducción de la 1º Edición en Inglés
Febrero de 1991



Contenidos

0.0	Prefacio	5
0.1	Plan de inspección e introductorio	6
0.2	Fuentes de voltaje	8
0.3	Equipamiento	9
1	Filtros de polarización	
1.1	Uso de los filtros de polarización (experimentos introductorios)	13
1.2	Ley de Malus	17
2	Refracción óptica doble de deformación (anisotropía óptica)	
2.1	Polarización cromática	23
2.2	Refracción doble en diversos materiales	27
2.3	Refracción doble de deformación en muestras de plexiglás	31
3	Polarización producto de la reflexión y refracción	
3.1	Polarización producto de la reflexión	35
3.2	Polarización producto de la refracción	39
3.3	Ley de Brewster	43
4.0	Polarización producto de la dispersión	49
5.0	Actividad óptica	
	Polarimetría (sacarimetría)	
	Dispersión rotatoria	57
	Aparatos requeridos	63
	Sumario de los módulos STM de física	65

Prefacio

El tema de la “óptica ondulatoria” es tratado en tres manuales separados de la serie “Science Teaching Modules” (Módulos de Capacitación Científica) (STM).

Óptica ondulatoria, difracción (589 251)

Óptica ondulatoria, interferencia (589 261)

Óptica ondulatoria, polarización (589 271)

(► Resumen de los grupos de temas de física STM al final del libro)

Este manual de “Óptica ondulatoria, polarización” tiene como objetivo el instruir a los estudiantes a realizar experimentos independientes con los juegos de equipos Op1 y Op8 (y algunos otros elementos).

(► Capítulo 0.1/0.2)

Mientras que la difracción y la interferencia pueden observarse de igual manera con ondas longitudinales (por Ej. ondas ultrasónicas) y ondas transversales (por Ej. ondas transportadas por el agua), la polarización es una característica típica de las ondas transversales. En los experimentos principalmente cualitativos descritos aquí, el estudiante debe reconocer a partir de la mayor cantidad de ejemplos posibles que la luz puede describirse como una onda transversal.

Las descripciones de los experimentos del STM en este manual consisten en fichas de trabajo de los estudiantes acompañados por la información para el profesor.

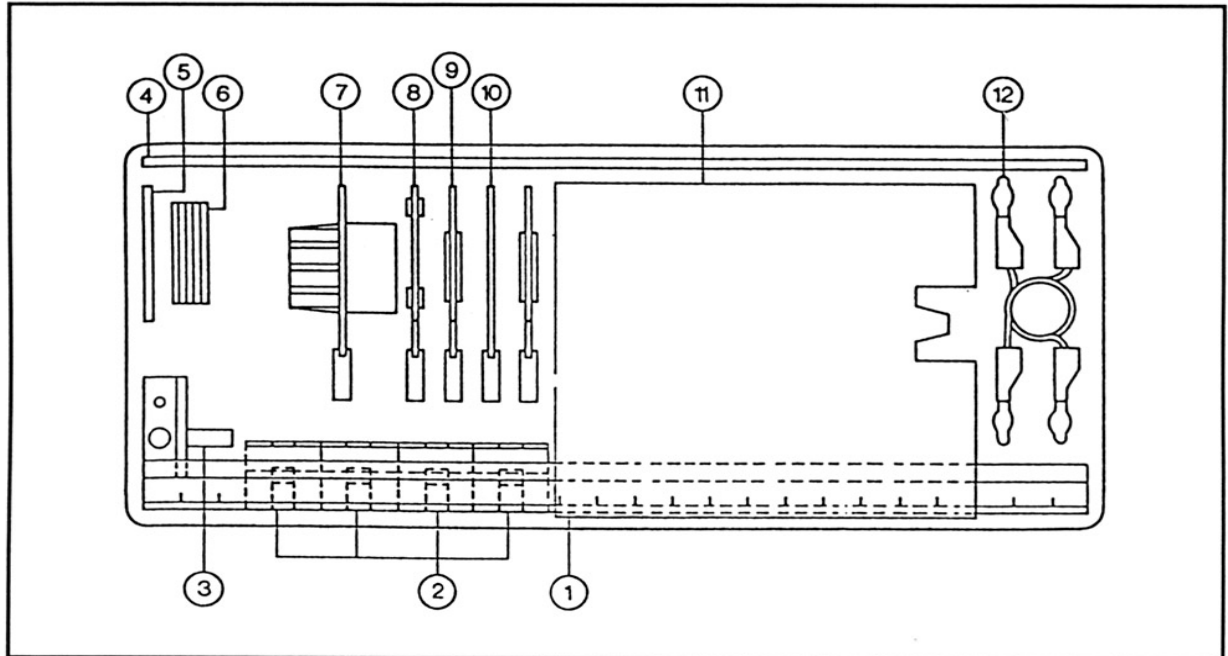
Las fichas de trabajo de los estudiantes pueden ser fotocopiadas para el uso propio del establecimiento.

Los objetivos del experimento se describen en la sección del profesor para cada tema.

Usted podrá apreciar las líneas generales del material tratado si lee esta parte antes de comenzar.

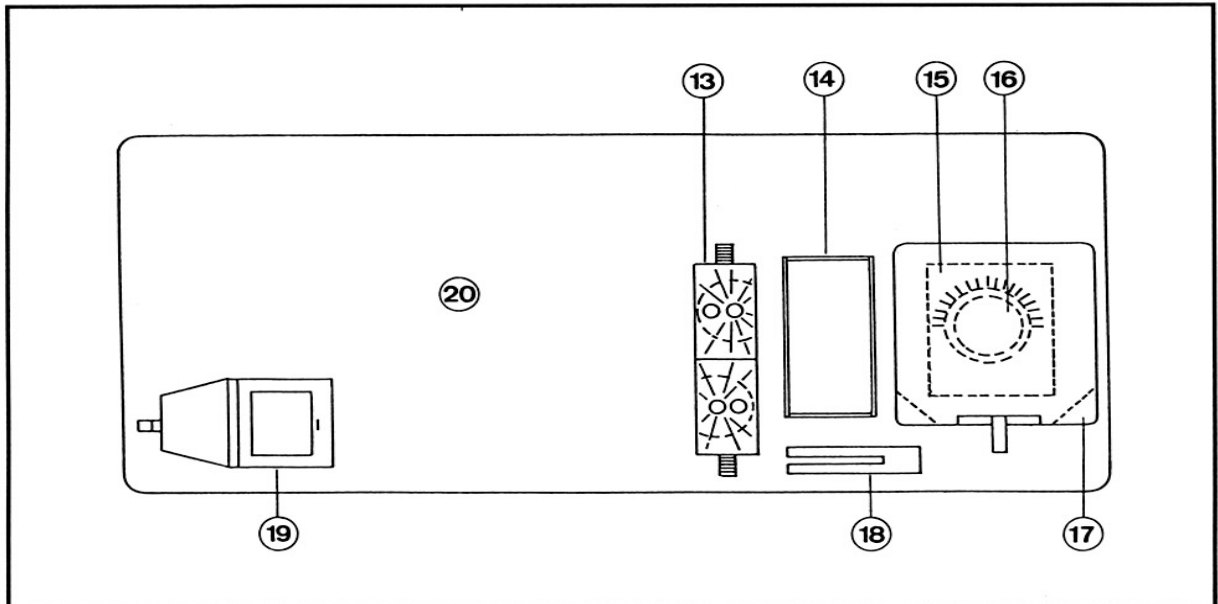
Plan de inspección e introductorio

OP1



(1)	Raíl metálico de precisión de 0.5 m	460 82
(2)	4 jinetillos con pinza	460 95
(3)	Portaplacas	459 30
(4)	Escala metálica	460 97
(5)	Espejo plano 50 x 75 mm	459 38
(6)	Juego de 2 diafragmas con ranura	461 62
	Juego de 4 diafragmas diferentes	461 63
(7)	Lámpara tubular	459 03
(8)	Soporte para diafragmas y diapositivas	459 33
(9)	Lente B, $f = 100$	459 62
(10)	Pantalla traslúcida	459 24
(11)	Mesa de óptica	(459 15)
(12)	Par de cables, 50 cm	501 45

OP8



(13)	2 jinetillos con pinza	460 95
(14)	Cubeta de vidrio	477 02
(15)	Juego de 50 porta objetos	662 093
(16)	2 filtros de polarización	472 38
(17)	Pantalla de vidrio acrílico	459 23
(18)	Objeto fotoelástico	471 94

Recomendado de OP 7:

(19)	Caja con espejo	459 17
(20)	Espacio libre para el equipamiento de Op 7	

Fuentes de voltaje

1) Voltaje de CA de 12 V~

Ej.

Fuente de alimentación de baja tensión de 3 A (522 16)

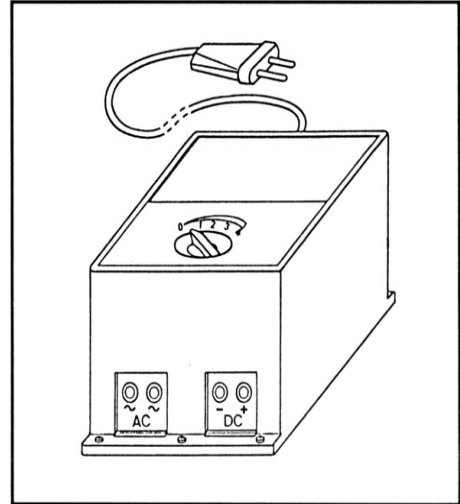
Salidas:

3/6/9/12 V ~ ; 3 A

3/6/9/1 V - ; 3 A

Fusible:

Protección contra sobrecarga térmica
(conmutador bimetálico)

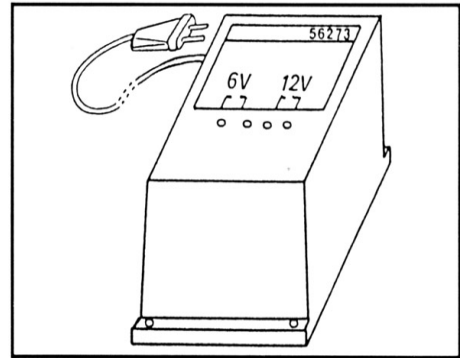


2) Voltaje de CA de 6 V ~ / 12 V ~ CA

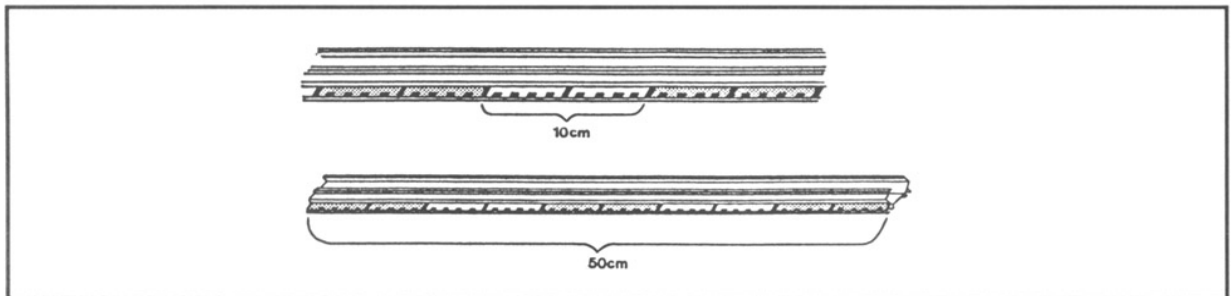
Ej.

Transformador

6/12 V; 30 W (562 73)



Equipamiento



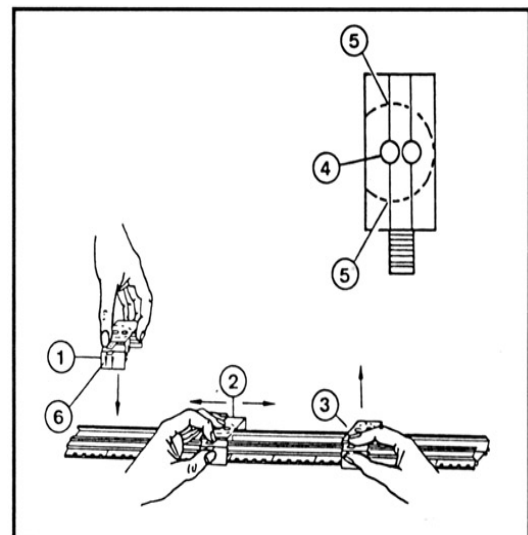
Raíles metálicos de precisión, 0.5 m (banco óptico)

Tarea: sujetar los jinetillos con pinza en los que se insertan diversos componentes ópticos, dependiendo del experimento. Escala dividida en bloques alternativos rojos y blancos de 10 cm. Cada bloque se subdivide en secciones en cm. Los números dados en las ilustraciones de armado se refieren a la escala.

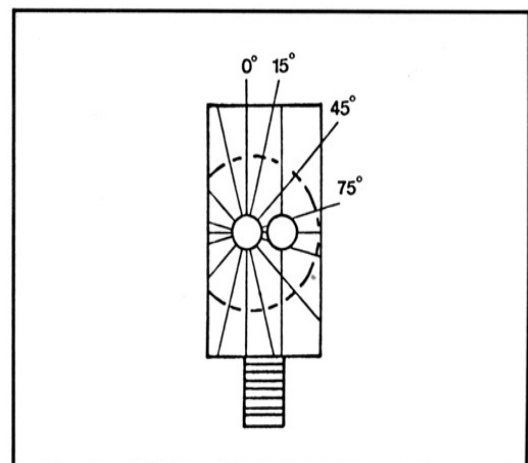
Jinetillos con pinza

Usados para sostener los componentes ópticos individuales (por Ej. lentes, soportes para diafragmas, etc). Se coloca el jinetillo en el banco óptico y se lo fija mediante presión (1).

Al presionar juntamente las dos lengüetas, puede ser desplazado fácilmente a lo largo del banco óptico (2) o también puede ser extraído (3). Los componentes ópticos se introducen en la abertura izquierda (4) y se ajustan por medio de la ranura (5), es decir, se alinean. La información en cm de las ilustraciones se refiere a la flecha indicadora izquierda situada en la base del jinetillo con pinza (6).



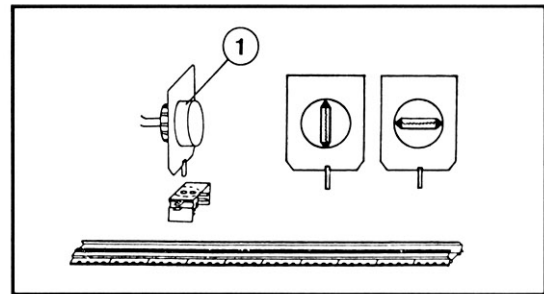
Al presionar juntamente las dos lengüetas, el jinetillo puede ser desplazado fácilmente a lo largo del banco óptico. Esto significa que, al realizar ajustes, su mano no interrumpirá la trayectoria del rayo bajo observación. La abertura derecha del jinetillo también permite fijar un soporte para diafragmas y diapositivas que se introducirán detrás de la lente sujeta en la abertura izquierda. Mas aún, componentes tales como una pantalla traslúcida y un espejo pueden ajustarse en la abertura izquierda bajo ángulos de 15, 45 y 75 con respecto al eje óptico.



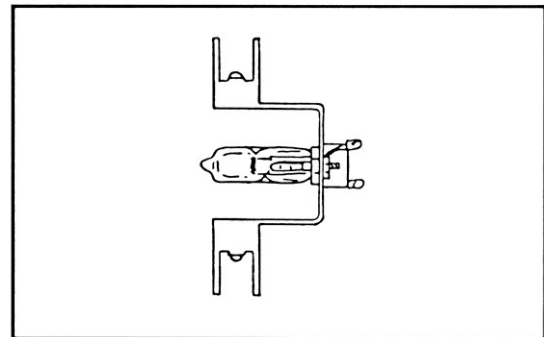
Lámpara tubular

Se inserta la varilla del bastidor de la lámpara en la abertura izquierda del jinetillo. El tubo de la lámpara (1) puede girarse, pudiéndose así ajustar el filamento de la lámpara en posición vertical u horizontal.

Máxima tensión de trabajo de la lámpara:
12 V CA/CC



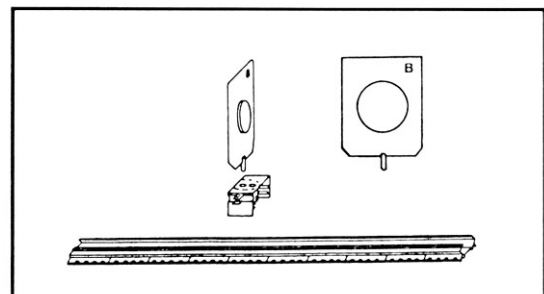
Lámpara halógena insertada para la lámpara tubular



Lentes

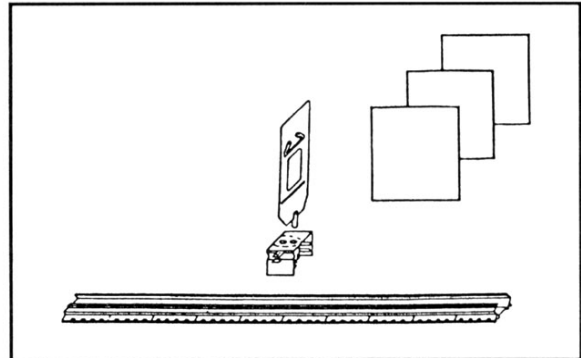
Se introducen las varillas de las lentes en la abertura izquierda del jinetillo. El punto central de la lente estará de este modo marcado en el raíl por la flecha izquierda. La letra de identificación de la lente, por ejemplo "B", debe estar lejos de la lámpara..

Lente B, $f = 10 \text{ cm}$



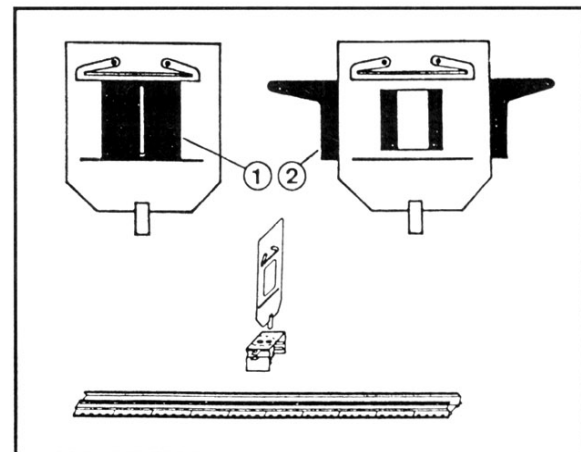
Filtros

Los filtros se mueven en la trayectoria del haz con la ayuda del soporte para diafragmas y diapositivas. Dependiendo de los requerimientos, pueden ser empujados a ambos lados del soporte.

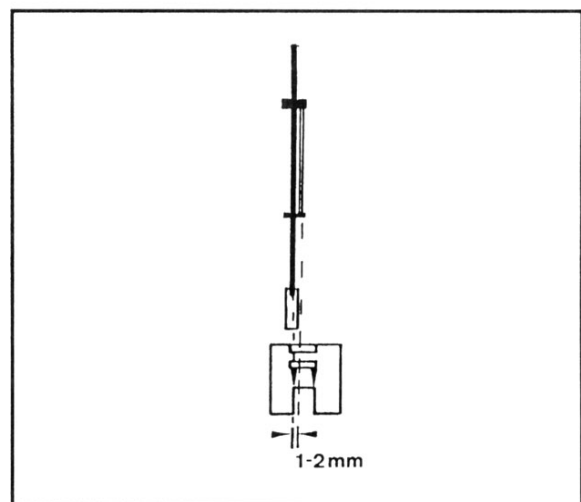


Soporte para diafragmas y diapositivas

Se inserta la varilla del soporte del diafragma en el jinetillo con pinza. El punto central del diafragma queda indicado por la flecha derecha. Se empuja el diafragma (en el marco de la diapositiva) hacia el lado del soporte que esta lejos de la lámpara bajo la presilla. El otro lado se utiliza para acomodar el soporte para diapositivas y diafragmas (2) con el cual una parte de la abertura del diafragma puede cubrirse.



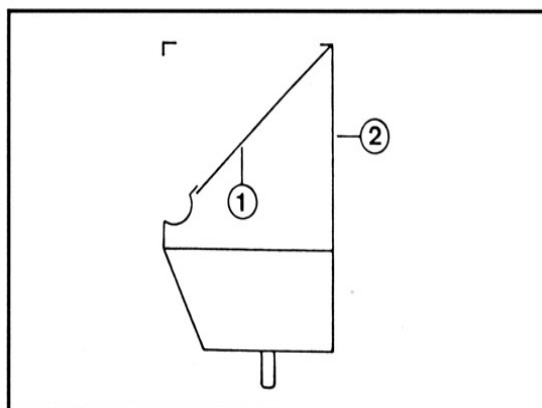
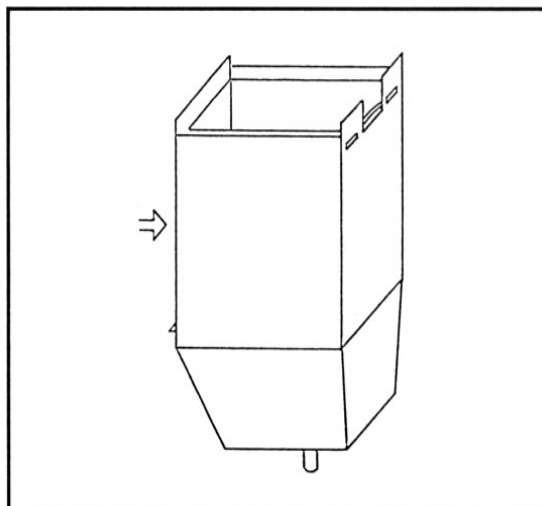
La posición de la flecha indicadora del jinetillo y la posición del objeto (diafragma) introducido en el jinetillo del diafragma difieren ligeramente entre si. La flecha indicadora da la posición del marco. Los diafragmas y las diapositivas pueden encontrarse 1 o 2 mm detrás del marco, ya que están asegurados al lado del soporte que esta situado lejos de la lámpara. De todas maneras, esta diferencia puede en la mayoría de los casos ser despreciada teniendo en cuenta la precisión requerida para estos experimentos.



Caja con espejos

La caja con espejos permite observar imágenes de baja intensidad luminosa en ambientes escasamente oscurecidos.

(1): Espejo, inclinado 45° , direcciona la luz que ingresa desde arriba a la izquierda, facilitando de este modo una mejor observación.



Película de polarización

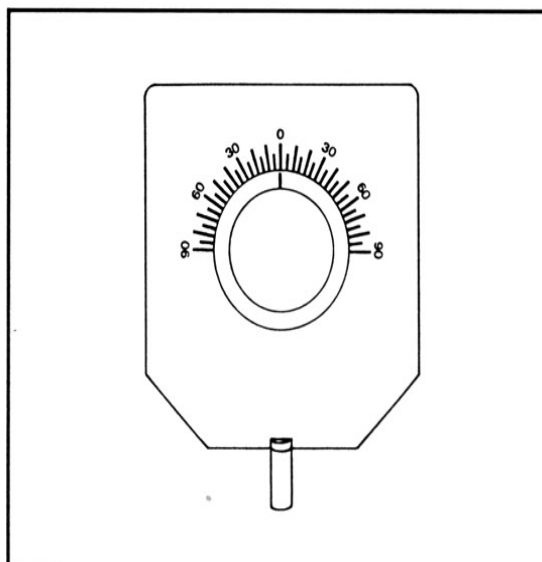
Películas plásticas que polarizan la luz, es decir transmiten la luz en cierta dirección desde posibles direcciones de oscilación perpendiculares a la dirección de propagación (filtro de transmisión). En el modelo de onda electromagnética, esta es la dirección del vector de intensidad de campo eléctrico, también conocido como el vector E o vector luminoso.

La dirección esta indicada en el borde de la película giratoria.

El soporte de la película posee una escala para ajustes angulares de precisión.

Datos técnicos:

- Factor de polarización: 97 %
- Diámetro del filtro: 3.5 cm
- Escala: 0 a $\pm 90^\circ$ con graduación 5
- Dimensiones de la pantalla: 11 x 10 cm²



Uso de filtros de polarización

Tarea Observar la luz del cielo y la luz reflejada por los objetos en el medio ambiente a través de un filtro de polarización.

Utilizar un filtro de polarización cruzado para investigar los cuerpos transparentes.

Aparatos

1 Banco óptico
2 Jinetillos con pinza
2 Filtros de polarización
1 Pantalla de vidrio acrílico
Diversos objetos transparentes, por ejemplo, reglas, rompedores plásticos, papel de envolver transparente

Método

Experimento 1

► Fig. 1
Observe sus alrededores a través del filtro de polarización, cambiando el ajuste angular del mismo modo que usted lo hace.

En particular, mire el cielo en distintas direcciones y preste atención a las reflexiones de la luz sobre los objetos.

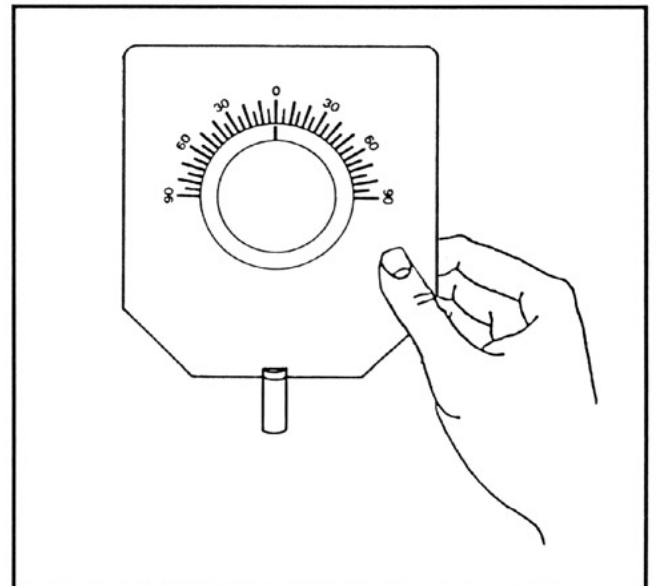


Fig. 1: Filtro de polarización

Experimento 2

Con ayuda de los jinetillos con pinza, asegure el filtro de polarización al raíl metálico de precisión como se muestra en la Fig. 2

Varíe los ángulos de ambos filtros de polarización.

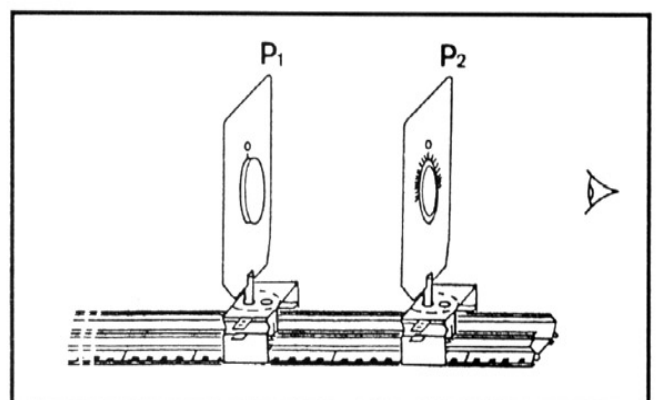


Fig.2: Si la luz cae en dos filtros de polarización (desde la izquierda en el montaje del experimento), el primero (P_1) actúa como un polarizador, el segundo (P_2) como un analizador.

Ficha de trabajo de los estudiantes 2

Experimento 3

Instale el filtro de polarización con una diferencia angular de 90° (cruzado).
Sujete objetos transparentes entre los dos filtros de polarización, por Ej. una pantalla de vidrio acrílico, una regla, un rompedor plástico.

Observaciones

Evaluación

¿Que propiedades de la luz pueden determinarse con ayuda de un filtro de polarización?

¿Cuando es conveniente utilizar los filtros de polarización?

Uso de filtros de polarización

Objetivos

Reconocer

- Que la luz en el medio ambiente esta parcialmente polarizada
- Que los cuerpos transparentes influyen sobre la luz polarizada.

Nota

Los experimentos descritos aquí son cualitativos. Deben ser considerados como experimentos preliminares e introductorios para experimentos posteriores.

Equipamiento

1 Raíl metálico de precisión, 0.5 m	460 82
2 Jinetillos con pinza	460 95
2 Filtros de polarización	472 38
1 Pantalla de vidrio acrílico	459 23

Diversos objetos transparentes, por Ej. reglas, rompedores plásticos

Observaciones

Experimento 1

Una parte de la luz que puede verse a ojo descubierto desaparece cuando se mira a través de un filtro de polarización.

Esta es la luz difusa en el cielo y la luz reflejada en los objetos.

El azul del cielo aparece particularmente intensa si mira a través del filtro de polarización con un ángulo 0 perpendicular a la dirección de los rayos del sol.

Investigación más precisa: ➤ Experimento 4

Experimento 2

La intensidad de la luz es máxima a través de los filtros de polarización cuando ambos filtros de polarización están ajustados idénticamente: $a_1 = a_2$. La intensidad es mínima cuando los filtros de polarización están cruzados ($\alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ$). Con ajustes intermedios, se puede observar una transición de la intensidad luminosa.

Investigación mas precisa: ➤ Experimento 1.2.

Experimento 3

Los objetos transparentes hechos de plástico colocados entre filtros de polarización cruzados hacen aparecer a la luz algunas veces con zonas oscuras.

A la inversa, otros objetos exhiben colores luminosos.

Ejemplos: Reglas, rompedores plásticos, papel de envolver transparente.

Investigación mas precisa: ➤ Experimentos 2.1 – 2.3

Información para el maestro 2

Evaluaciones:

- Una propiedad de la luz, más precisamente que es una onda transversal, puede ser determinada con la ayuda de un filtro de polarización.
- Los filtros de polarización se utilizan provechosamente para instrumentos ópticos. Por ejemplo, existen vidrios con filtros de polarización.

En particular, los filtros de polarización en los soportes giratorios se utilizan en las cámaras y equipos de filmación enfrente de las lentes.

Esto permite reducir completamente o al menos parcialmente las reflexiones e imágenes de espejos en el vidrio, agua, pintura y otras superficies, ya que la luz reflejada es (parcialmente) polarizada. Esto posibilita fotografiar objetos, aún si están detrás de superficies reflexivas.

Más aún, las reflexiones del color de, por ejemplo la luz del cielo azul, pueden reducirse en los objetos para la fotografía en color para que los colores del propio objeto aparezcan más intensos.

Ley de Malus

Consigna Medir la intensidad de la luz luego de que esta pasa a través de dos filtros de polarización, las direcciones de polarización que juntas forman un ángulo α .

Equipamiento

1 Banco óptico, 50 cm
4 Jinetillos con pinza
1 Base aisladora en el jinetillo con pinza
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W
1 Lente B, $f = 10$ cm
2 Filtros de polarización
2 Secciones de tablero de zócalo

1 Fotorresistor, LDR 0.5
1 Resistor, 1 Ka
1 Diodo Zener ZPD 6.2
3 Pares de cables, 50 cm, por Ej.: rojo, azul
1 Cable, 25 cm, por Ej.: azul
1 Fuente de voltaje, 9 V CC

Instalación

► Fig. 1

Polarizador P_1 : Para simplificar la lectura, ajuste la escala hacia el lado que esta la fuente luminosa.

Polarizador P_2 : Escala en el lado del LDR

Ajuste: 0°

Empuje el LDR lo mas cerca posible del polarizador P_2

Preste atención a las distancias entre los elementos!

Desde luego, la lámpara puede ser alimentada

también con voltaje de CA, por ejemplo desde la fuente de alimentación de voltaje extra-bajo de 3 A.

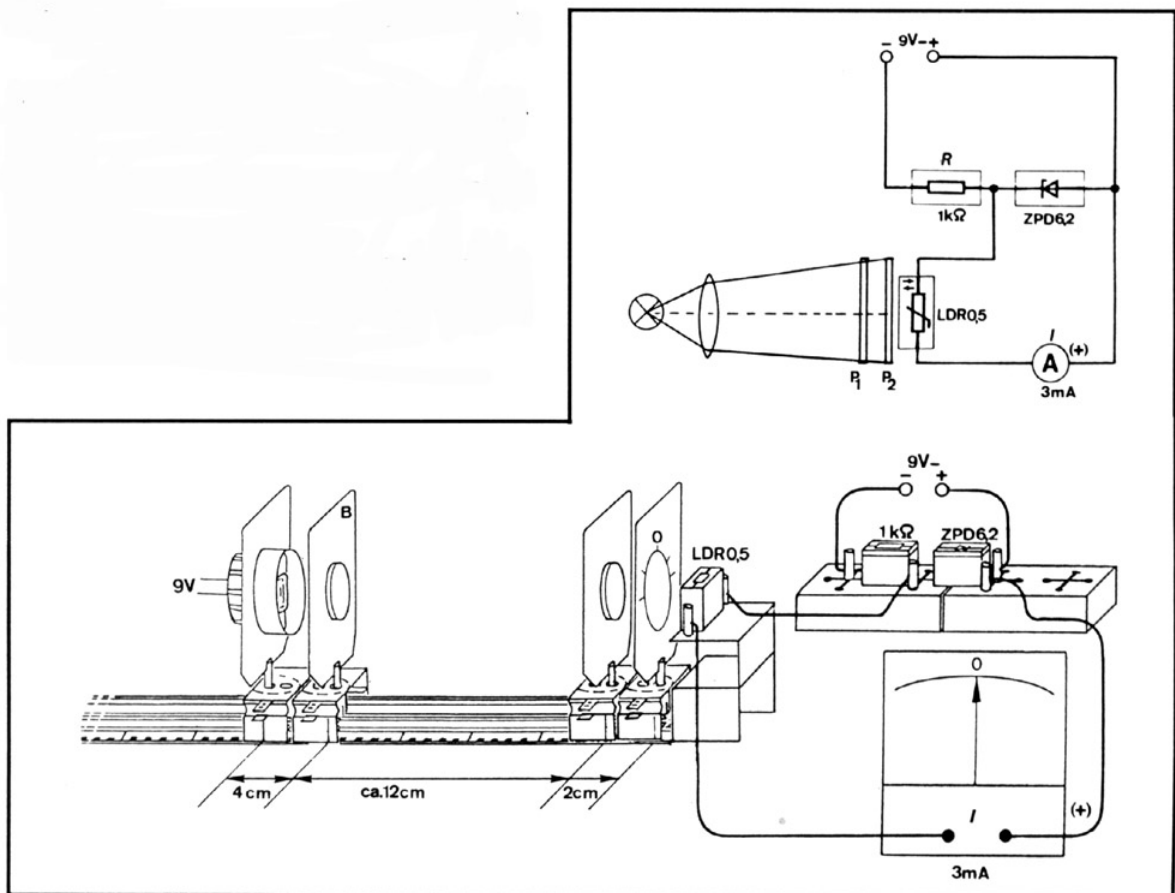


Fig. 1: Montaje del experimento para medir la intensidad de iluminación detrás de dos filtros de polarización
Abajo: mostrado en perspectiva paralela
Arriba: mostrado en vista superior

Con respecto al circuito eléctrico
Explique el modo de funcionamiento.
¿Cual es la función del diodo Zener?
¿Para que se mide la corriente I?

Método

Ajuste el filtro de polarización P_1 a 0. Mueva la lámpara con la lente de tal manera que el amperímetro muestre 3 mA:
Varíe el ángulo en el polarizador P_1 en 10 etapas.
Mida la corriente I en cada caso. ► Tabla

Evaluación

- Represente gráficamente I en función de α .
- Calcule $\frac{I}{I_0}$. ► Tabla

Tabla

I ₀ = Corriente en $\alpha = 0^\circ$			
$\frac{\alpha}{1^\circ}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{I}{I_0}$	$\cos^2 \alpha$
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			

De acuerdo a la ley de Malus,

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \alpha$$

Para verificar, calcule $\cos^2 \alpha$ (► Tabla) e I y represente gráficamente $\frac{I}{I_0}$ en función de $\cos^2 \alpha$.

¿Bajo que precondiciones se aplica esta ley?
¿Qué factores determinan las diferencias?

Ley de Malus

Objetivos: Conocer y poder verificar la ley de Malus:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

α = Ángulo entre las direcciones de dos filtros de polarización

I = Intensidad luminosa en el ángulo α

I_0 = Intensidad luminosa en $\alpha = 0^\circ$

Poder interpretar las diferencias de la ley con los filtros de polarización no ideales.

Equipamiento

1 Raíl metálico de precisión, 50 cm		460 82
4 Jinetillos con pinza		460 95
1 Base aislante en el jinetillo con pinza . .	de	590 87
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W		459 03
1 Lente B, $f = 10$ cm		459 63
2 Filtros de polarización		472 38
2 Secciones de tablero de zócalo		476 71
1 Fotorresistor, LDR 0.5		578 02
1 Resistor, 1 Ka		577 44
1 Diodo Zener ZPD 6.2		578 55
3 Pares de cables, 50 cm, por Ej. rojo, azul		501 45
1 Cable, 25 cm, por ej. azul	de	501 44
1 Fuente de voltaje, 9 V CC, por ej. una fuente de alimentación de voltaje extra- bajo de 3 A		522 16
1 Amperímetro, 3 mA, por ej. multímetro M ₂ H-LH		531 552

Montaje

Si se utiliza la fuente de alimentación de bajo voltaje de 3 A, la tensión para la lámpara también puede obtenerse del tomacorriente de CA.

Con respecto al circuito eléctrico

El fotorresistor (LDR) varía su resistencia eléctrica de manera aproximadamente proporcional a la intensidad luminosa.

Cuando el voltaje es constante circula una corriente I proporcional a la resistencia.

I es entonces una medida de la intensidad luminosa.

El diodo Zener – en serie con el resistor R – asegura una tensión constante que no depende de la carga.

Resultados:

Tabla: Ejemplo de medición

$I_0 = \text{corriente a } \alpha = 0$			
$\frac{\alpha}{1^\circ}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{I}{I_0}$	$\cos^2 \alpha$
0	3.0	1.00	1.00
10	2.9	0.97	0.97
20	2.7	0.90	0.88
30	2.4	0.80	0.75
40	2.0	0.67	0.59
50	1.5	0.50	0.41
60	1.0	0.33	0.25
70	0.6	0.20	0.12
80	0.3	0.10	0.03
90	0.2	0.07	0

Representación gráfica $I(\alpha)$

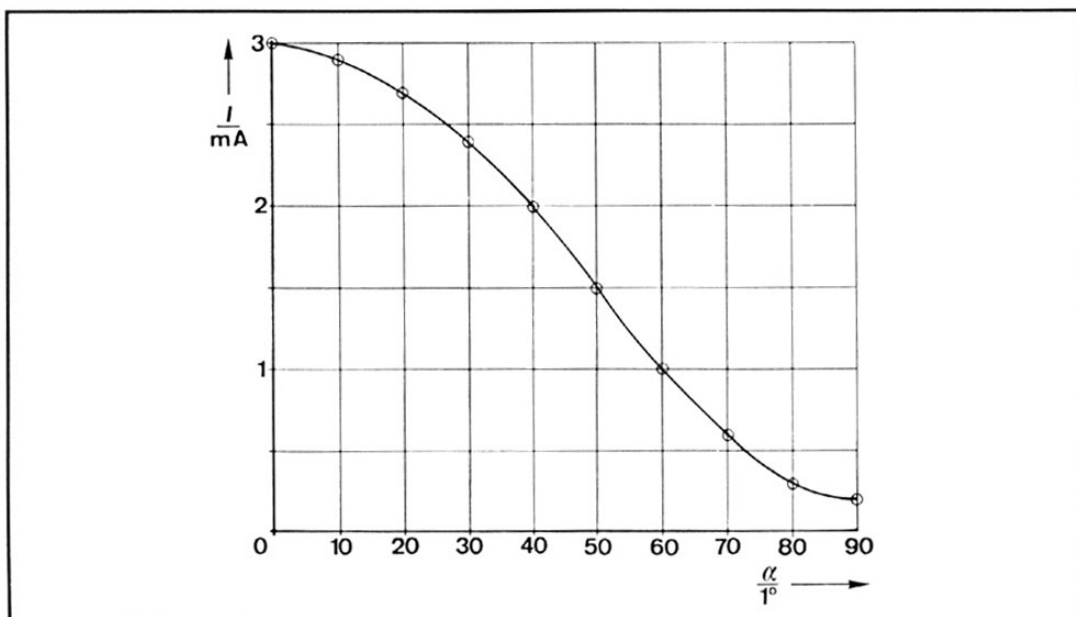


Fig. 2: La corriente I proporcional a la intensidad de iluminación del LDR en función del ángulo α .
 $\alpha =$ ángulo por el cual difieren las posiciones del filtro de polarización.



Evaluación

Representación gráfica de $\frac{I}{I_0}$ en función de $\cos^2 \alpha$.

La representación muestra una relación lineal entre $\frac{I}{I_0}$ y $\cos^2 \alpha$ para una gran gama de ángulos.

Si se aplica la ley de Malus rigurosamente, los valores medidos deberán encontrarse en la línea recta del punto cero con el gradiente 1.

Todos los valores reales son de alguna manera demasiado grandes (en aproximadamente 0.07 en gamas de gran ángulo).

Explicación:

Los filtros de polarización permiten pasar una pequeña proporción de la luz, aún en la dirección de bloqueo. Esto es particularmente evidente cuando el ajuste del filtro de polarización ($\alpha = 90^\circ$) está cruzado, caso en el cual los filtros de polarización ideales no deben permitir el paso de la luz.

Base teórica de la ley de Malus

E_0 es la amplitud de la intensidad de campo eléctrico de la luz (polarizada) que pasa a través del filtro de polarización P_1 .

Si los ajustes de los filtros de polarización forman juntos el ángulo α , E_0 puede ser dividido en dos componentes:

$E_0 \sin \alpha$ (en la dirección de bloqueo)

$E_0 \cos \alpha$ (en la dirección de transmisión)

Puesto que la intensidad luminosa es proporcional al cuadrado de la intensidad de campo eléctrico, la ley de Malus se aplica directamente:

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{E_0 \cos \alpha}{E_0}\right)^2 = \cos^2 \alpha$$

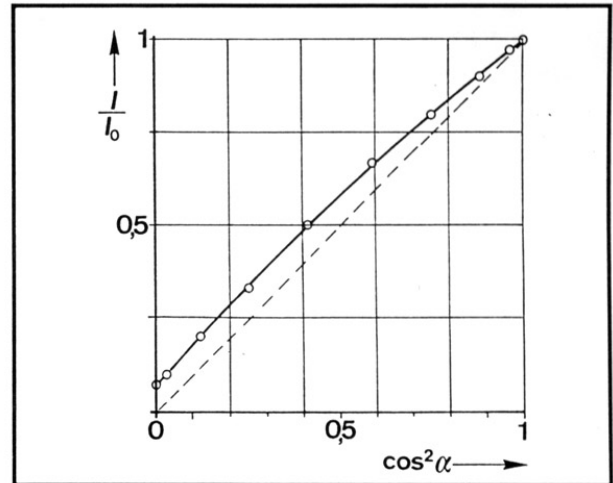


Fig. 3:

$\frac{I}{I_0}$ en función de $\cos^2 \alpha$

I = Corriente en el ángulo α

I_0 = Corriente en el ángulo $\alpha = 0$

La línea recta punteada representa la relación de acuerdo a la ley de Malus para los filtros de polarización ideales.

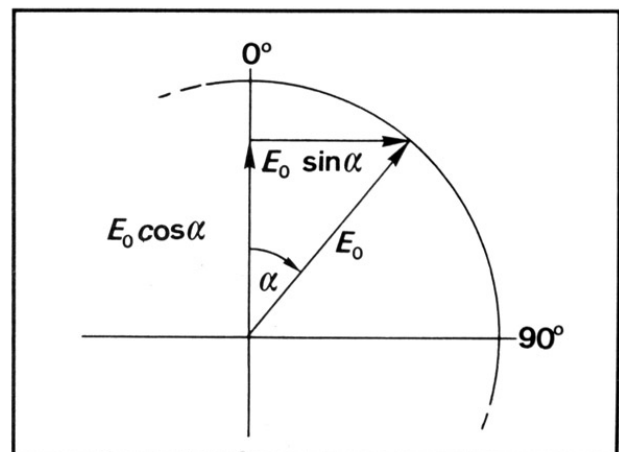


Fig. 4: Diagrama para derivar la ley de Malus



Polarización cromática

Consigna Investigar los efectos de cintas adhesivas y películas de empaque entre el polarizador y el analizador

Aparatos

- 1 Banco óptico, 0.5 m
- 3 Jinetillos con pinza
- 2 Filtros de polarización
- 1 Pantalla de vidrio acrílico
- Tiras de cinta adhesiva, aprox. 40 cm
- Película de empaque transparente

Montaje

► Fig. 1

Distancia entre filtros de polarización en el banco óptico, aprox. 15 cm.

Alinee el filtro de polarización como se muestra en la Fig. 1:

(1) a 0°

(2) a $+90^\circ$

Método

Experimento 1

Sostenga tiras de cinta adhesiva en diversos ángulos entre el polarizador (1) y el analizador (2).

Observación?

Para que ángulos α son mayores los cambios perceptibles?

El ángulo positivo correspondiente debe llamarse α_0 .

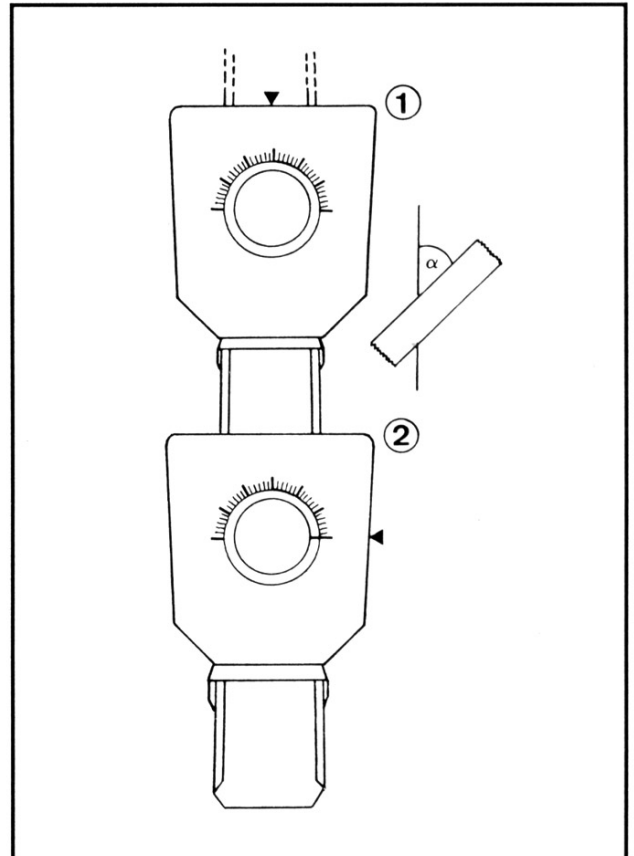


Fig. 1: Montaje del experimento con filtros de polarización cruzados. Cuando esta enfrente de una fuente luminosa, el filtro de polarización (1) funciona como un polarizador y el filtro de polarización (2) funciona como un analizador. Los plásticos transparentes bajo estudio están situados entre (1) y (2).



Experimento 2

(Debe realizarse primeramente el Experimento 1, en el cual se determina en ángulo α_0)
Adhiera cinco tiras de cinta adhesiva de aprox. 6 cm de longitud escalonadas una arriba de la otra como se muestra en la Fig. 2.

Luego pegue las tiras a la pantalla de vidrio acrílico como se muestra en la Fig. 3 bajo un ángulo α_0 .

Fije la pantalla de vidrio acrílico al jinetillo con pinza entre (1) y (2) en el banco óptico.

Gire lentamente el filtro del analizador (2).

Experimento 3

Ajuste del analizador (2): $+90^\circ$

Gire lentamente el polarizador (1) en sentido de las agujas del reloj.

Preste atención a la tira central.

¿En que secuencia cambian los colores?

Experimento 4

Para diversos ajustes del filtro del polarizador (1), seleccione la posición 0° y 90° del analizador (2) en cada caso.

Experimento 5

Pruebe la reversibilidad de la trayectoria de la luz para diversos ajustes del filtro de polarización.

Como puede ocurrir esto fácilmente?

Experimento 6

Sujete una película de empaque transparente entre el polarizador (1) y el analizador (2).
Cambie los ajustes del filtro y la forma de la película.

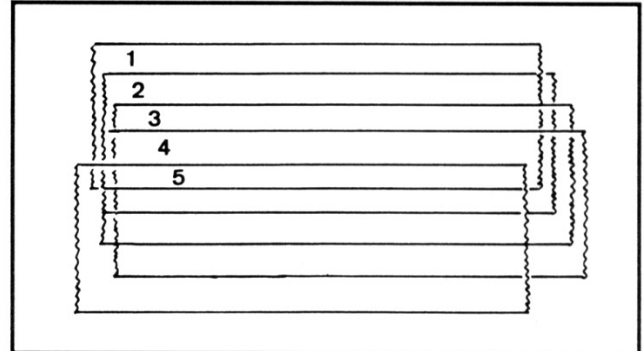


Fig. 2. Cinco tiras escalonadas lateralmente de cinta adhesiva pegadas una arriba de la otra de forma tal que cada tira se encuentre encima de la primera. Esto le da cintas con espesores simples, dobles, triples, cuádruples y quíntuples.

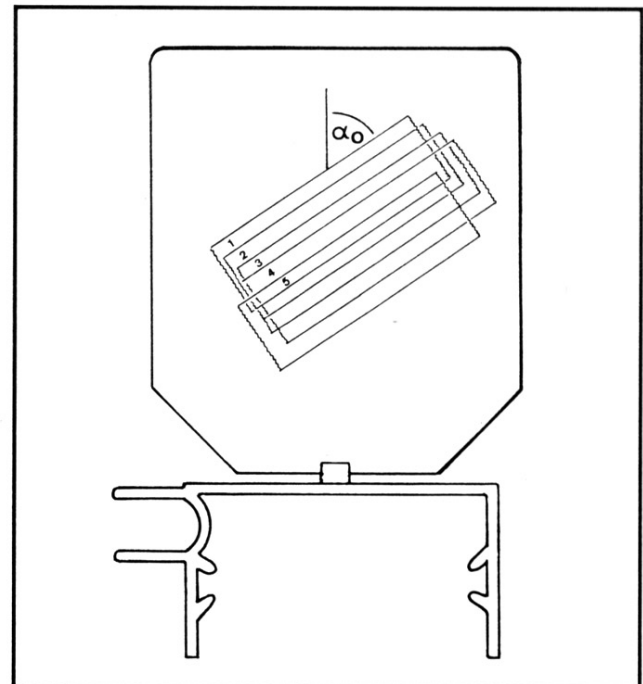


Fig. 3: Tiras de cinta adhesiva puestas juntas en la pantalla de vidrio acrílico como se indica en la Fig. 2.

Evaluación

La descomposición de la luz polarizada (blanca) en dos componentes polarizados de color se conoce como polarización cromática.

¿Que se puede decir sobre la base de los experimentos efectuados?

Polarización cromática

Objetivos

1. Reconocer que los plásticos estirados o enrollados (por ej. cinta adhesiva) dividen la luz blanca en dos componentes simétricos a la dirección de extensión, siendo estos componentes
 - complementarios en color y
 - polarizados perpendicularmente el uno al otro
2. Reconocer que los colores complementarios dependen
 - del ángulo que forma el nivel de polarización de la luz blanca con la dirección de extensión de la película
 - del grosor de la película.

Aparatos

1	Raíl metálico de precisión, 0.5 m	460 82
3	Jinetillos con pinza	460 95
2	Filtros de polarización	472 38
1	Pantalla de vidrio acrílico	459 23
	Tiras de cinta adhesiva, aprox. 40 cm	
	película de empaque transparente	

Observaciones

Experimento 1

El campo visual entre los filtros de polarización cruzados – sin la cinta adhesiva – es oscuro. Se torna mas visible con una tira de cinta adhesiva entre los filtros de polarización. Aparece en su máxima claridad en un ángulo de

$$\pm \alpha_0 = 45^\circ$$

Experimento 2

Las tiras de diversos grosores aparecen cada una con diferentes colores. Cuando el analizador (2) es girado en la dirección de la cinta adhesiva ($\alpha_0 = 45^\circ$), los colores se vuelven cada vez mas pálidos. Cuando las direcciones de la cinta adhesiva y del analizador (2) coinciden, las tiras son incoloras.

Las cintas de color a $45^\circ \pm \beta$ son complementarias entre si y en $\beta = 45^\circ$ tienen su mayor intensidad.

Experimento 3

Cuando se gira el polarizador (1) en sentido de las agujas del reloj (visto desde enfrente de la fuente luminosa), los colores de las tiras cambian en el siguiente orden:

.....verde, amarillo, naranja, rojo, violeta, azul, verde.....

Los colores se repiten cada 180.

Las transiciones de color están menos diferenciadas cuando las capas son mas delgadas.

Nota:

La disposición de los colores corresponde a la de un espectro. De todas maneras, los colores aquí están mezclados.



Información para el profesor 2

Experimento 4

En cualquier posición del polarizador (1), un cambio en el analizador (2) de 0° a 90° y viceversa resulta en un cambio a las tiras de colores complementarios.

Experimento 5

La trayectoria de la luz puede cambiarse si se mira en dirección opuesta a través del filtro de polarización a contraluz.

La dirección de la luz no influye en las manifestaciones de color.

Experimento 6

Elabore, las imágenes de color pueden formarse con ayuda de una película de empaque transparente entre los filtros de polarización.

Evaluación

Si un conjunto de tiras de cinta adhesiva pegadas una arriba de la otra se sitúa entre dos filtros de polarización, aparece coloreado si uno de los filtros de polarización forma un ángulo de $0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$ con la dirección en la que se extienden las tiras de cinta adhesiva. La intensidad del color es máxima en $\alpha_0 = 45^\circ$.

El color percibido depende

- de la posición del otro filtro de polarización y
- del espesor de la película adhesiva

Nota

- La división de la luz blanca polarizada en componentes polarizados de color (polarización cromática) es típica para los plásticos que, debido al proceso de manufactura (estiramiento, arrollamiento), mantienen estados permanentes de esfuerzo que se vinculan a la refracción doble (anisotropía óptica).

Los vectores luminosos de los rayos ordinarios y extraordinarios poseen componentes paralelos a la dirección del analizador.

Estos se cancelan entre sí antes de entrar en el cristal. Debido a las diferentes velocidades de propagación de los componentes del rayo, hay un corrimiento de fase entre los correspondientes componentes. A causa de la caída en intensidad dependiente de la longitud de onda que resulta de la interferencia, la luz mixta emitida desde el analizador aparece coloreada.

- Experimento adicional:

Compruebe que no hay dispersión rotatoria presente en la polarización cromática.

También se necesita:

2 monocromadores diferentes

por ej.: filtro del rojo (468 03)

filtro del violeta (468 13)

La luz blanca no está presente en los experimentos 1 a 4. El filtro del rojo o el filtro del violeta se sujetan alternativamente en la trayectoria del haz. La posición de las tiras claras y oscuras de la cinta adhesiva no cambia, como se esperaría con la dispersión rotatoria.



Refracción doble en diversos materiales

Consigna Inspección óptica de un portaobjetos que es calentado y luego enfriado rápida e irregularmente:
Equipamiento auxiliar: filtro de polarización

Aparatos

- 1 Banco óptico, 0.5 m
- 2 Jinetillos con pinza
- 2 Filtros de polarización
- 1 Pantalla de vidrio acrílico
- 1 Portaobjetos
- Vidrios de anteojos

Montaje

► Fig. 1
Ajuste el polarizador y el analizador de manera cruzada (0° y 90°)

Método

Experimento 1

Sostenga el vidrio rápidamente enfriado entre los filtros de polarización.
Vea el portaobjetos y (1) a través de (2) a contraluz.
Coloque el portaobjetos en diferentes ángulos.

Experimento 2

Estudie la pantalla de vidrio acrílico entre los filtros de polarización cruzados.

Experimento 3

Estudie los vidrios de anteojos como se muestra en el sistema de la Fig. 1

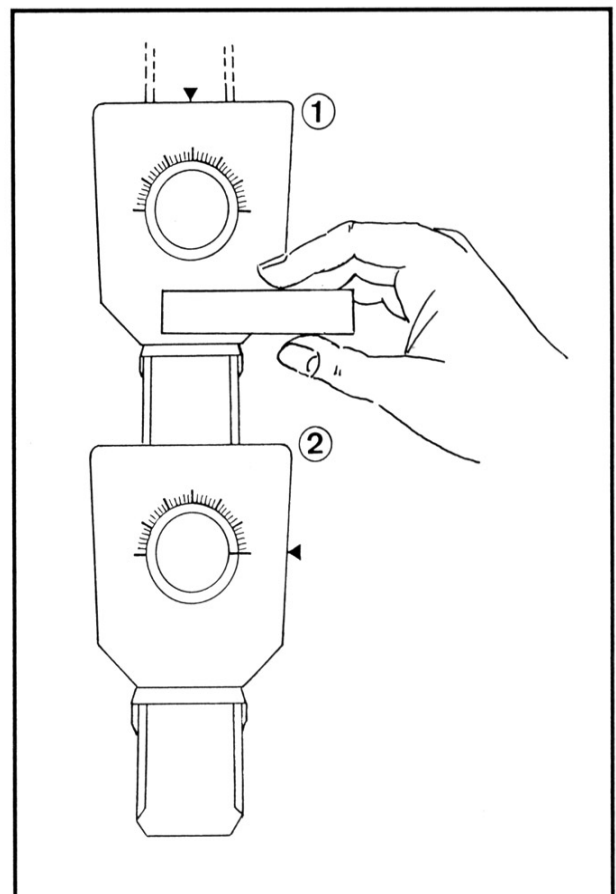


Fig. 1: Montaje del experimento
Filtros de polarización cruzados para estudiar cuerpos transparentes.
(1) Polarizador; (2) Analizador



Refracción doble en diversos materiales

Objetivos:

Poder estudiar

- Vidrios rápidamente enfriados
 - Vidrios acrílicos
 - Vidrios de anteojos
- para la anisotropía óptica con ayuda de los filtros de polarización.

Aparatos

1	Raíl metálico de precisión, 0.5 m	460 82
2	Jinetillos con pinza	460 95
2	Filtros de polarización	472 38
1	Pantalla de vidrio acrílico	459 23
1	Portaobjetos rápidamente enfriado de Vidrios de anteojos	662 093

Para obtener el vidrio rápidamente enfriado

1	Mechero de gas butano	666 711
1	Cartucho de gas butano (paquete de 3) de	666 712
1	Tenazas de crisol	303 68

Nota:

El vidrio rápidamente enfriable de alta calidad puede obtenerse del catálogo Nro. 471 61.

Resultados

Experimento 1

Hay evidencia de brillo en zonas pequeñas.

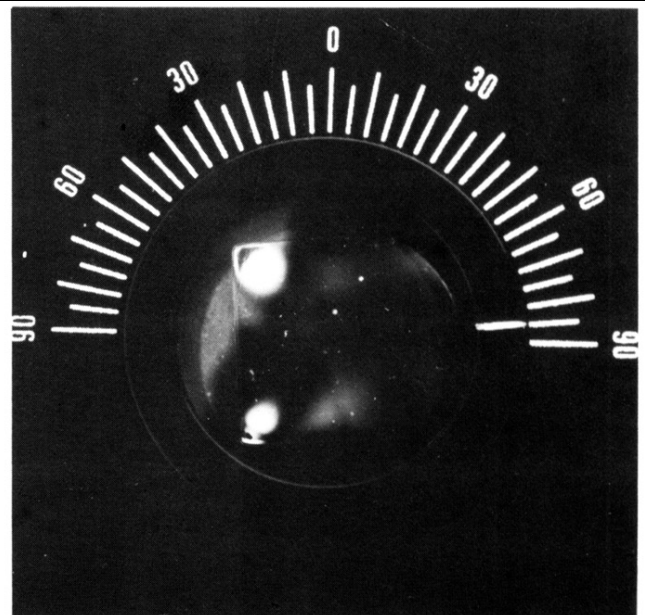


Fig. 3: Fotografía de un portaobjetos rápidamente enfriado colocado entre filtros de polarización cruzados.



Experimento 2

La pantalla de vidrio acrílico aparece mas brillante, con excepción de algunos puntos.

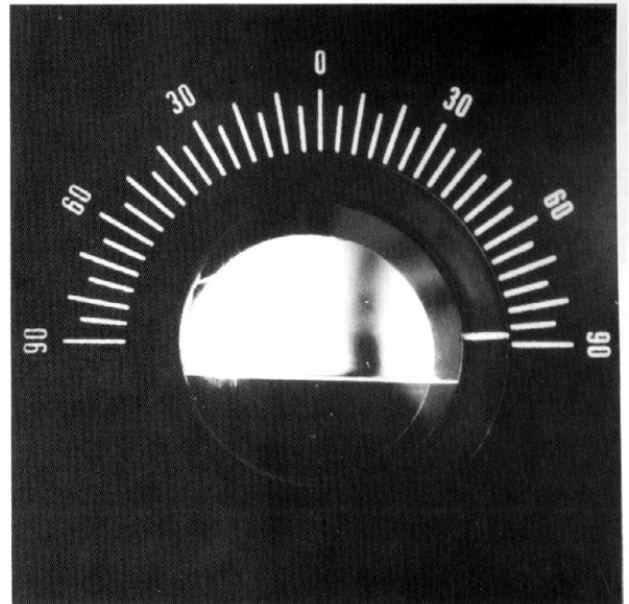


Fig. 4: Fotografía de la pantalla de vidrio acrílico situada entre los filtros de polarización cruzados.

Experimento 3

Los buenos vidrios de anteojos aparecen con brillo uniforme y no muestran zonas oscuras. Este no sucede siempre con los vidrios de anteojos plásticos.

Notas

- La refracción doble es un tipo especial de refracción luminosa, en la cual un haz de luz se divide en dos haces parciales. Esto puede observarse cuando el medio refringente del haz es ópticamente anisótropo, es decir, cuando la velocidad de propagación de la luz y por lo tanto también el índice de refracción dependen de la dirección.
- La refracción doble fue descubierta en 1669 por el Dinamarqués Erasmus Bartholinus. Dirigió verticalmente un rayo de luz a una placa hecha de cristal espato calizo (CaCO_3). Al hacer eso, observó que el haz de luz se fragmentaba en dos haces parciales. Recomendado para la demostración:
Cristal de calcita (472 02)
- El vidrio de seguridad es un vidrio ópticamente anisótropo. Es pretensado en áreas pequeñas y cuando se le aplica una intensa fuerza exterior, explota en pequeñas piezas.

Fabricación del portaobjetos rápidamente enfriado

Notas iniciales: Si es posible, los portaobjetos rápidamente enfriados deben ser preparados por el profesor. Una vez producidos los vidrios, pueden incorporarse al conjunto como un componente fijo.



Método

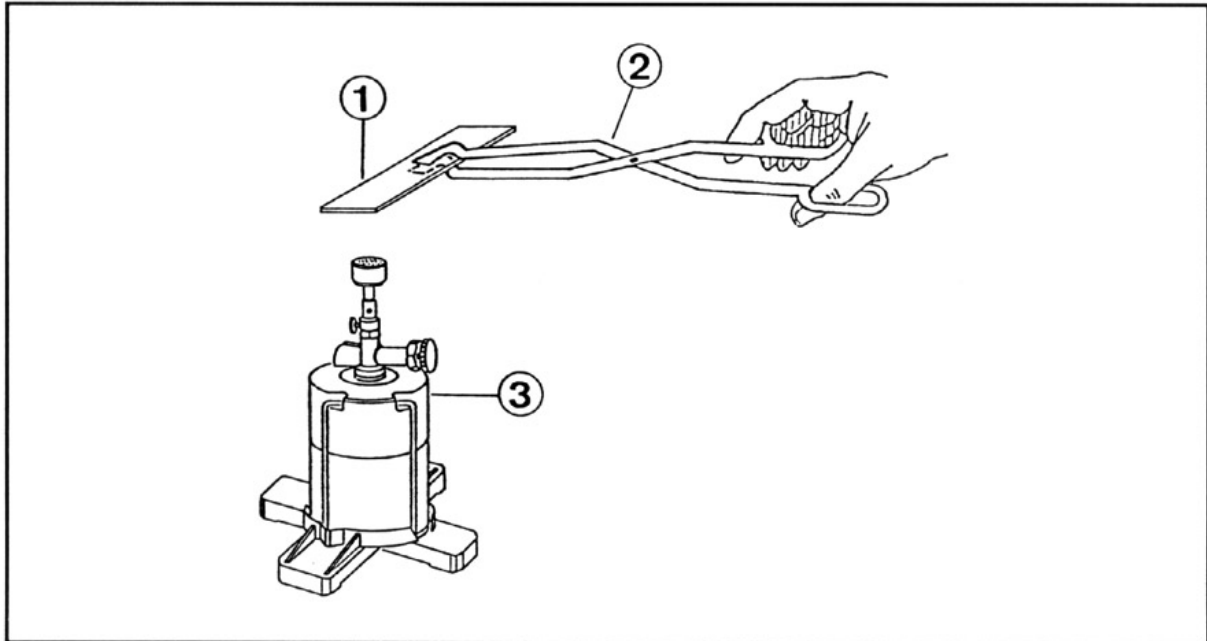


Fig. 2: Calentamiento de un portaobjetos que luego debe ser rápidamente enfriado en el aire.
(1) Portaobjetos; (2) Tenazas de crisol; (3) Mechero de gas butano

Caliente el portaobjetos sujetado con las tenazas de crisol sobre una llama suave y muévalo de un lado al otro hasta que el vidrio comience a ablandarse. Luego retire el portaobjetos de la llama y muévalo de un lado al otro en el aire para enfriarlo.



Refracción doble de deformación en muestras de plexiglás

Consigna Introducir el principio de la fotoelasticidad en una muestra de plexiglás.

Aparatos

- 1 Banco óptico, 0.5 m
- 2 Jinetillos con pinza
- 2 Filtros de polarización
- 1 Objeto fotoelástico

Montaje

► Fig. 1

Método

Sujete el objeto fotoelástico (muestra de plexiglás) entre el polarizador (1) y el analizador (2) como se muestra en la Fig. 1.

Aplique presión de intensidad variable a las patillas de la muestra.

Observación y evaluación

- ¿Que se puede observar cuando se aplica presión de intensidad variable a las patillas de la muestra?
- ¿Como puede utilizarse el efecto observado?

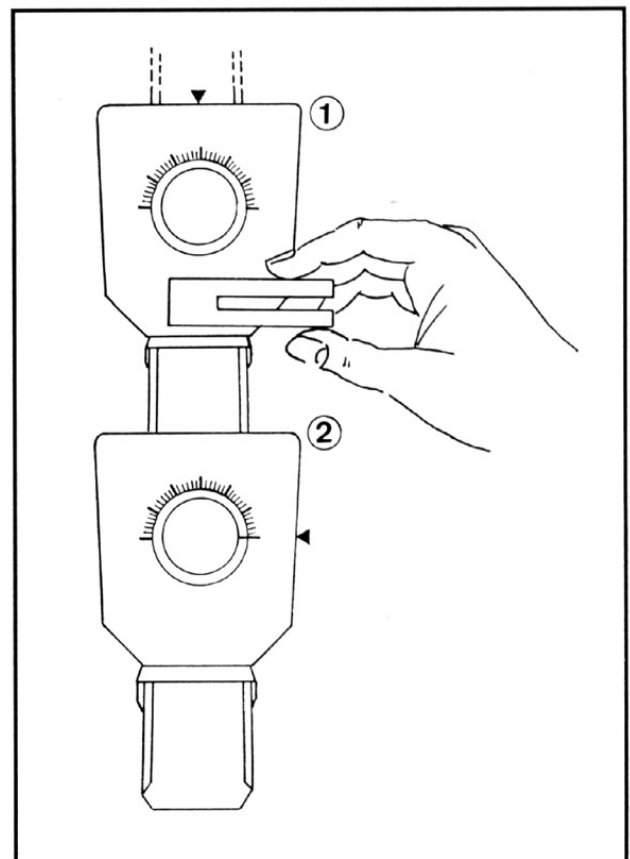


Fig. 1: Montaje del experimento: Filtros de polarización cruzados para estudiar un objeto fotoelástico.

(1) Polarizador; (2) Analizador



Información para el profesor 1

Refracción doble de deformación en muestras de plexiglás

- Objetivos** Aprender que
- los materiales como el plexiglás se vuelven ópticamente anisótropos debido al efecto de una fuerza externa.
 - con la ayuda de la anisotropía óptica, las tensiones internas en los cuerpos pueden hacerse visibles y pueden ser usadas técnicamente en la fotoelasticidad.

Aparatos:

1 Raíl metálico de precisión, 0.5 m	460 82
2 Jinetillos con pinza	460 95
2 Filtros de polarización	472 38
1 Objeto fotoelástico	471 94

Observación y evaluación

- El campo visual se mantiene oscuro si el objeto fotoelástico se coloca entre los filtros de polarización cruzados sin presión externa.

La muestra se torna parcialmente visible cuando se ejerce presión.

➤ Fig. 2

- El efecto observado puede usarse técnicamente con el fin de determinar puntos de tensión crítica en muestras fotoelásticas cuando se modelan cuerpos (por ej. ménsulas, ganchos). Otro uso posible es en convertidores (presión ➤ luz).

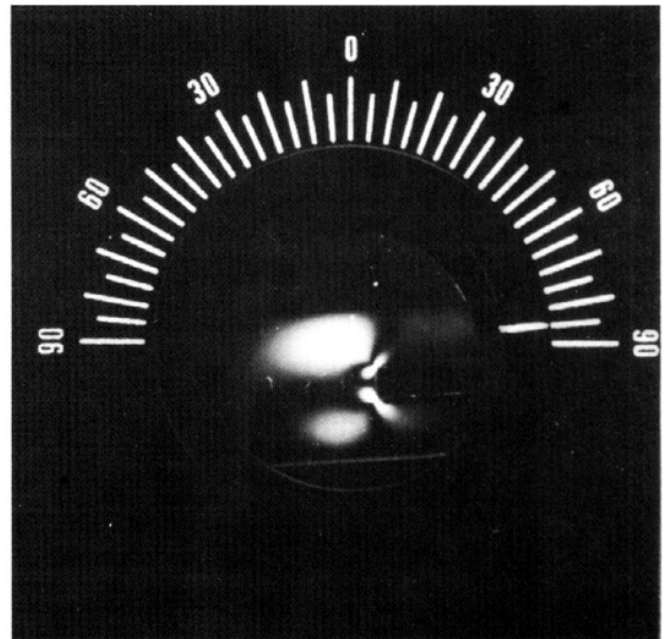


Fig. 2: Fotografía de un objeto fotoelástico bajo presión entre filtros de polarización cruzados



Nota

En la fotoelasticidad, se estudian las líneas de igual tensión (isocromatos) de las muestras.

Cuando se utiliza luz polarizada linealmente, estas líneas dependen de la alineación de la muestra entre el polarizador y el analizador. Esto puede verse cuando se gira la muestra.

Para poder mantener los isocromatos independientes de la dirección, no se debe trabajar con luz polarizada linealmente.

Por lo tanto, en los estudios de la fotoelasticidad se utiliza la luz polarizada circularmente, la cual no posee una dirección aparente.

Se puede crear luz polarizada circularmente con ayuda de la denominada placa $\frac{\lambda}{4}$, fabricada por ej. de calcita.

Referencias:

- Cat. No. 599 891 (Descripciones de Experimentos 87)
Experimento 5.4.2.2 "Polarización y refracción doble en la calcita"
- Contacto No. 17, Junio 1977, Página 6
"Experimentos con filtros de polarización y luz polarizada".



Polarización producto de la reflexión

Consigna Estudiar la luz reflejada por el vidrio acrílico, vidrio y superficies metálicas para la polarización.

Aparatos

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1 Banco óptico, 50 cm | 1 Portaobjetos |
| 2 Jinetillos con pinza | Metal con superficie en blanco, por ej. película de aluminio liso, aprox. 12 cm x 10 cm |
| 1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W | o |
| 1 Lente B, $f = 10$ cm | placa de hierro o similar |
| 1 Pantalla traslúcida | 1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojos, azules |
| 1 Pantalla de vidrio acrílico | 1 Fuente de voltaje de 12 V ~ CA |
| 1 Filtro de polarización | |

Montaje

► Fig. 1

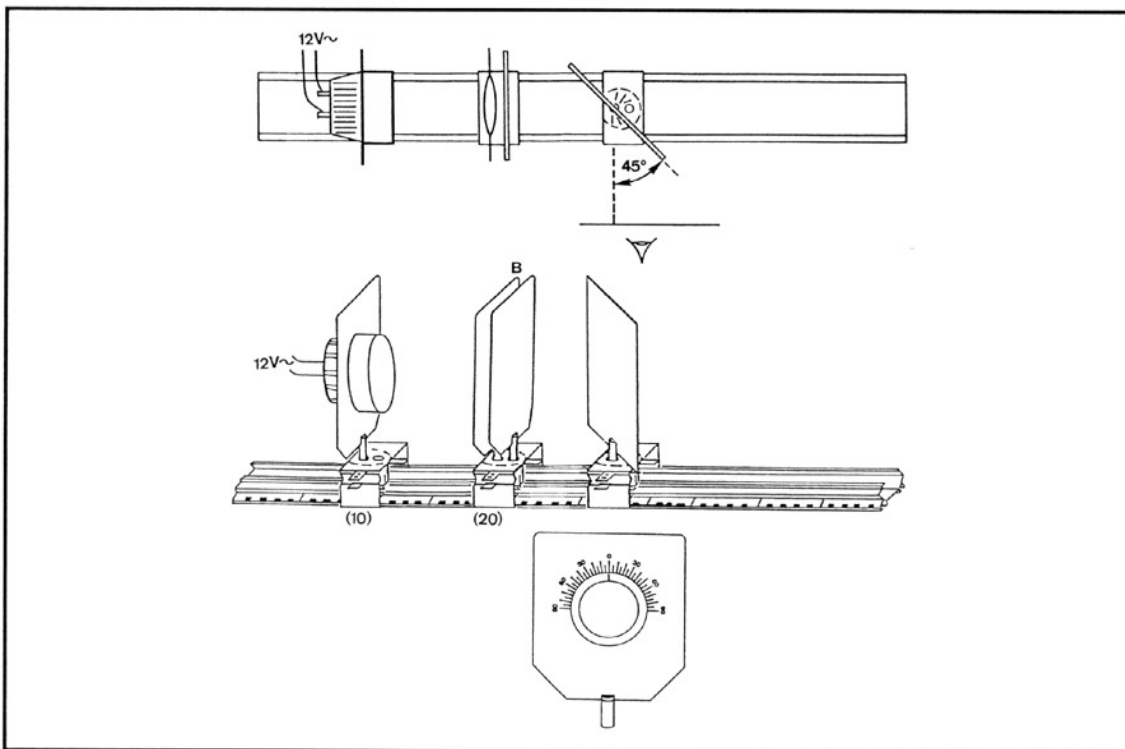


Fig. 1: Montaje del experimento para investigar la luz reflejada con ayuda de un filtro de polarización
Abajo: mostrado en vista paralela
Números entre paréntesis: posiciones medidas en cm de los puntos en el raíl metálico
Arriba: Vista superior del montaje
La pantalla de vidrio acrílico se introduce en el jinetillo con pinza y se lo gira 45°

La luz paralela se genera con ayuda de la lente B. Esta ilumina la pantalla traslúcida fijada al mismo jinetillo con pinza. La pantalla de vidrio acrílica se fija al jinetillo y se la gira 45°

► Fig. 1, arriba



Método

Experimento 1

Imagen de espejo del disco circular iluminado en la pantalla de vidrio acrílico

- a) observada a ojo descubierto
 - b) observada a través del filtro de polarización.
- Varíe el ángulo del filtro de polarización.

Experimento 2

En lugar de la pantalla de vidrio acrílico, sitúe un portaobjetos en el trayecto del haz de luz y repita el experimento 1.

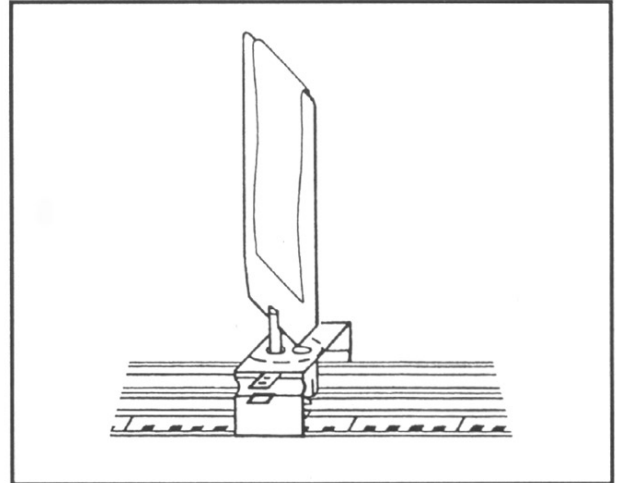


Fig. 2 Acercamiento del diagrama de la Fig. 1: Pantalla de vidrio acrílico con un papel de aluminio previamente colocado. Doble el papel en la parte superior.

Experimento 3

Introduzca una pantalla de vidrio acrílico como se muestra en la Fig. 1 (bajo 45°).

Suspenda un papel de aluminio liso como se muestra en la Fig. 2, enfrente de la pantalla de vidrio acrílico. Observe la luz reflejada desde un lado a través del filtro de polarización.

De la misma manera que para el experimento 1, cambie la posición del filtro de polarización entre 0° y 90°.

Experimento 4

En lugar del papel de aluminio, coloque un espejo en la trayectoria del haz de luz.

Observaciones:

¿Son aparentes las diferencias con las reflexiones en las superficies de los materiales investigados?

¿Que características especiales de estos materiales muestra la luz reflejada?

Formule los *resultados del experimento*.



Polarización producto de la reflexión

Objetivos Reconocer que el vidrio acrílico y el vidrio reflejan la luz mas fácilmente, y sus vectores de iluminancia vibran perpendicularmente al plano de incidencia.

Aparatos

1 Raíl metálico de precisión, 50 cm	460 82	Metal con superficie brillante, por ej. película de aluminio liso, aprox. 12 cm x 10 cm o
3 Jinetillos con pinza	460 95	placa de hierro, por ej. electrodo de hierro
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W	459 03	o placa de inducción
1 Lente B, f = 10 cm	459 62	o similar
1 Pantalla traslúcida	459 24	1 Par de cables, 50 cm, por ej.
1 Pantalla de vidrio acrílico	459 23	rojos, azules.
1 Filtro de polarización	472 38	501 45
1 Portaobjetos	de 662 093	1 Fuente de voltaje de 12 V ~ CA
		por ej. 562 73
		ó
		522 16

Observaciones

Experimento 1

Cuando se lo ve a través del filtro de polarización, la luz reflejada del disco circular puede percibirse con diferentes grados de brillo, dependiendo de la posición del filtro.

Mayor brillo en 0°

Menor brillo en 90°

Experimento 2

Igual que el experimento 1

Experimento 3/4

No se pueden determinar direcciones privilegiadas con el filtro de polarización en el caso de la luz reflejada sobre una superficie metálica.

El espejo de vidrio trasero refleja la luz principalmente en el revestimiento metálico.

Resultados del experimento

La luz reflejada sobre la superficie del vidrio acrílico esta parcialmente polarizada. Se refleja preferentemente la luz cuyos vectores luminosos vibran perpendicularmente al plano de incidencia. No hay manifestaciones aparentes de polarización de este tipo en el caso de las reflexiones sobre superficies metálicas.

Nota

Hay un ángulo de incidencia en el cual la luz reflejada esta completamente polarizada.

➤ Experimento 3.3

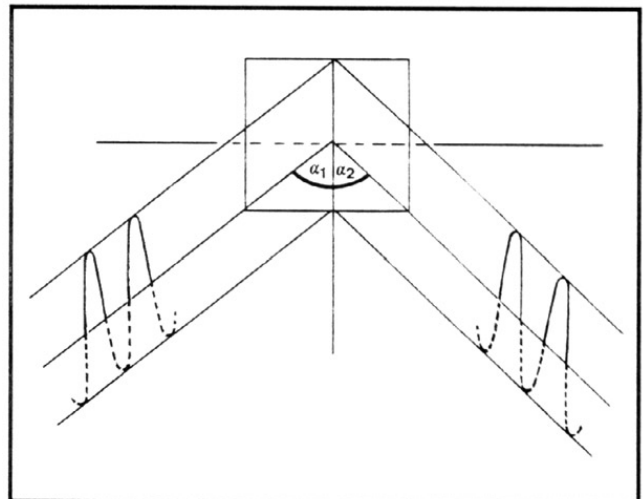


Fig. 3: Diagrama de representación:
La luz se refleja preferentemente por el vidrio y superficies metálicas si el vector luz (= Vector E = Vector de la intensidad de campo eléctrico) vibra perpendicular al plano de incidencia.



Polarización producto de la refracción

Consigna Inspeccionar la luz refractada para la polarización

Aparatos

- 1 Banco óptico, 50 cm
- 2 Jinetillos con pinza
- 1 Tabla de óptica
- 1 Lámpara tubular 12 V, 18 W
- 1 Lente B, $f = 10$ cm
- 1 Pantalla traslúcida

- 15 Portaobjetos
- 1 Filtro de polarización
- 1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojo, azul
- 1 Fuente de voltaje de CA de 12 V

Adicional:

Cinta adhesiva de aprox. 10 cm

Montaje

► Fig. 1

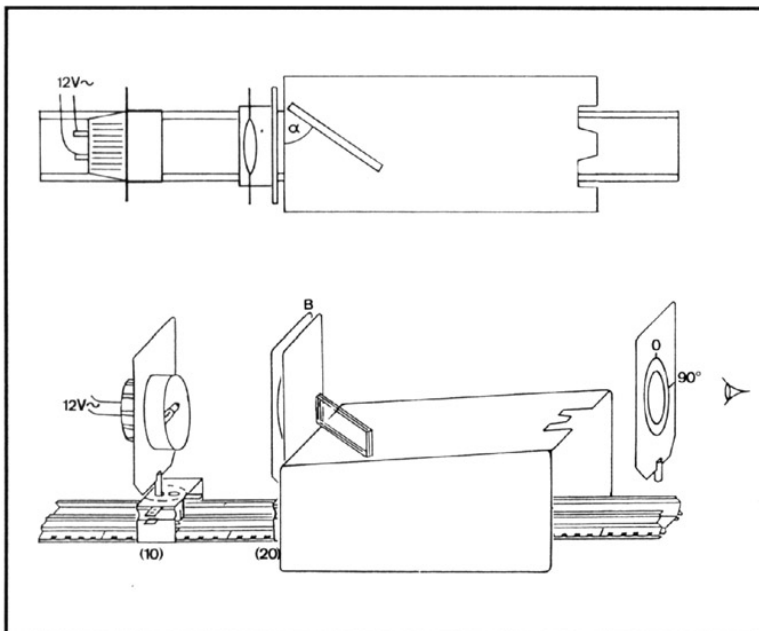


Fig. 1: Montaje del experimento para estudiar la polarización resultante de la refracción.

Abajo: mostrado en perspectiva paralela

Arriba: el mismo montaje visto desde $\alpha = 60^\circ$

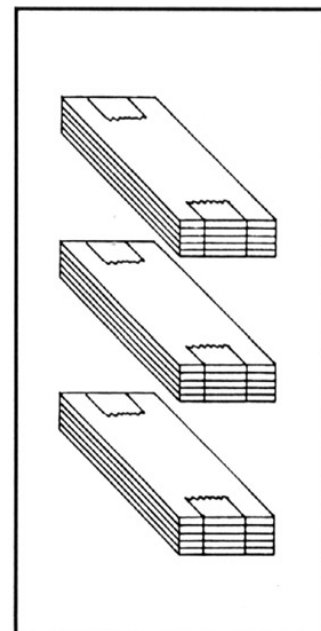


Fig. 2: Portaobjetos, 5 en cada caso, pegados entre si de los extremos con cinta adhesiva. Esto permite colocar las placas de vidrio de manera vertical en la trayectoria del haz.

Coloque 5 portaobjetos uno arriba del otro y adhiera los extremos entre si con cinta adhesiva.

► Fig. 2



Método

Experimento 1

Coloque una pila de 5 portaobjetos en la mesa de óptica como se muestra en la Fig. 1. Observe a través del filtro de polarización la luz que pasa a través de los portaobjetos. Cambie la posición del filtro de polarización entre 0° y 90° .

Experimento 2

Repita el experimento 1 usando 10 y 15 portaobjetos.

Experimento 3

Con 15 portaobjetos en la trayectoria del haz, investigue la luz que pasa a través de ellos y la luz reflejada con ayuda del filtro de polarización.

Resultado

Resuma y explique cualitativamente en algunas líneas las observaciones efectuadas en los experimentos individuales.



Polarización producto de la refracción

Objetivos

Reconocer que

- la luz se polariza parcial y linealmente debido a la refracción
- el grado de polarización puede incrementarse por múltiple refracción de la luz
- la dirección de polarización de la luz refractada forma ángulos rectos con la luz reflejada.

Aparatos

1 Raíl metálico de precisión, 50 cm460 82
2 Jinetillos con pinza	460 95
1 Mesa de óptica	459 15
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W	459 03
1 Lente B, $f = 10$ cm	459 62
1 Pantalla traslúcida	459 24
15 Portaobjetos	662 093
1 Filtro de polarización472 38
1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojo, azul	501 45
1 Fuente de voltaje de 12 V CA por ej.	562 73
ó.522 16

Adicional:

Aprox. 10 cm de cinta adhesiva

Observaciones

Experimento 1

Cuando el filtro de polarización esta ajustado a 0° , la luz que pasa por él aparece significativamente debilitada. La debilidad disminuye si el filtro es girado desde 0° a 90° .

Experimento 2

Al ir aumentando la cantidad de portaobjetos, la diferencia en intensidad luminosa de la luz cuando el filtro de polarización esta colocado en 0° y 90° es cada vez mas evidente .

Experimento 3

La luz que pasa por la pila de portaobjetos y la luz reflejada están en gran parte polarizadas linealmente. Las direcciones de vibración están alineadas entre sí de manera perpendicular.

► Fig. 3

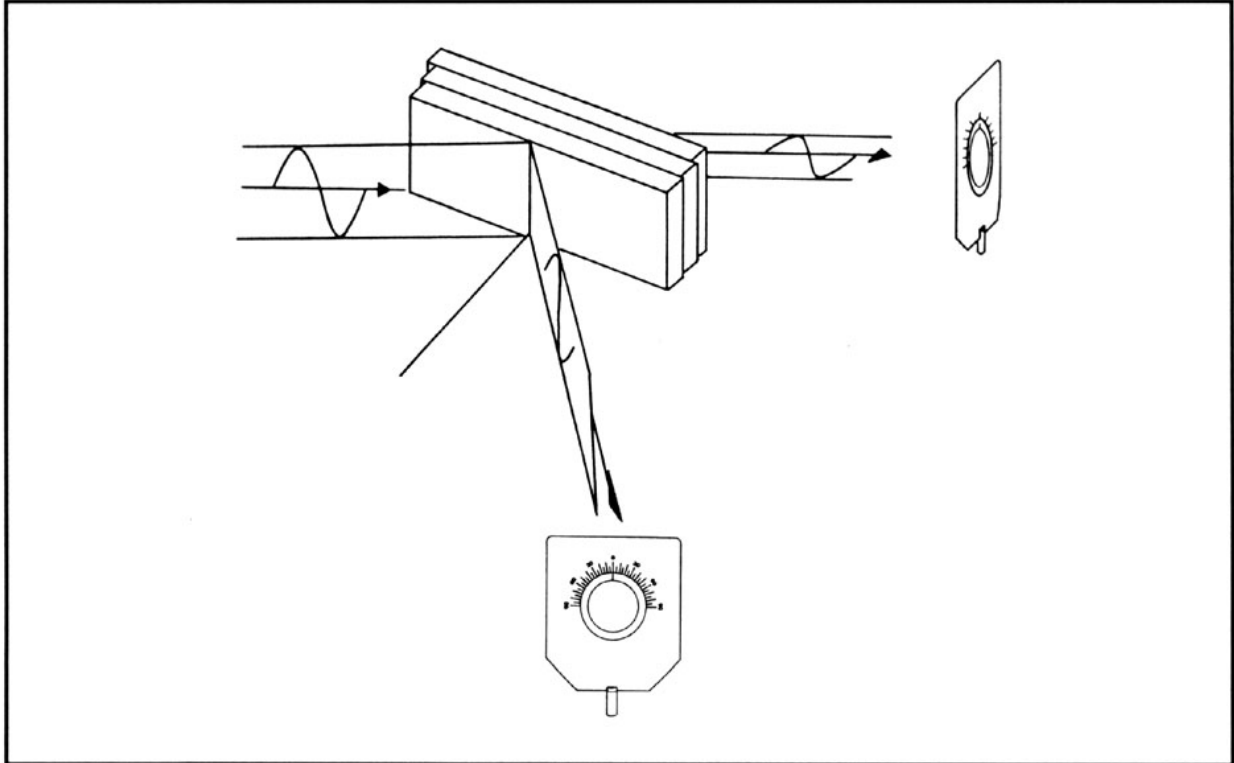


Fig. 3: Polarización de la luz con refracción y reflexión en varias placas de vidrio.
Dirección de vibración del vector luminoso

- En el haz de luz refractado: en el plano de incidencia
- En el haz de luz reflejado: perpendicular al plano de incidencia

Explicaciones (cualitativas)

La luz no polarizada se polariza hasta cierto punto cuando ingresa en un cuerpo con una densidad óptica diferente. Cuando pasa a través de varias placas de vidrio, esto ocurre dos veces en cada placa de vidrio.

Esto significa que la luz que ha atravesado por ejemplo 15 placas de vidrio esta casi completamente polarizada.

Un conjunto de placas de vidrio filtra de la luz no polarizada una proporción cuyo vector luminoso vibra en el plano de incidencia.

En el haz de luz incidente, todas las direcciones de vibración se producen por igual en el centro. Esto significa que no ha de sorprender que el haz reflejado esté polarizado linealmente perpendicular al haz, es decir, en ángulos rectos al plano de incidencia.

Nota

- Si la luz cae bajo el denominado ángulo de máxima polarización (en el vidrio, aprox. 57°), la luz reflejada en la primera superficie límite ya esta completamente polarizada linealmente.

► Experimento 3.3, Ley de Brewster



Ley de Brewster

Consigna Determinar las condiciones óptimas para la polarización de la luz reflejada

Aparatos

- 1 Banco óptico, 50 cm
- 2 Jinetillos con pinza
- 2 Filtros de polarización
- 1 Lámpara tubular 12 V, 18 W
- 1 Lente B, $f = 10$ cm

- 1 Pantalla traslúcida
- 1 Mesa de óptica
- 1 Cuerpo semicircular
- 1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojo, azul
- 1 Fuente de voltaje de CA de 12 V
- 2 Hojas de papel blanco, DIN A5

Montaje

► Fig. 1

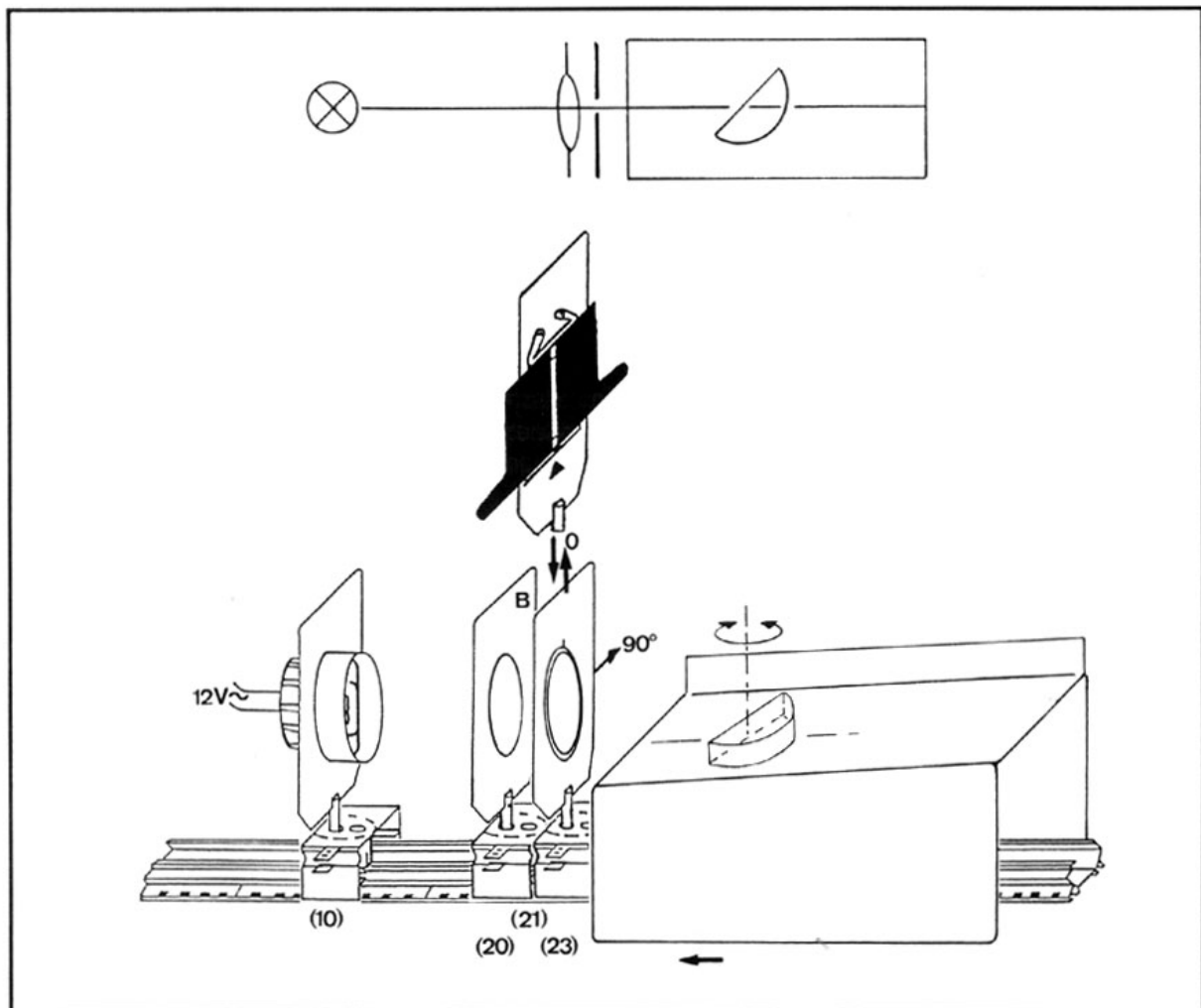


Fig. 1: Montaje del experimento para estudiar la reflexión de la luz polarizada. Los números entre paréntesis indican las posiciones en el rail metálico de precisión medidas en cm.



Haga una ranura de aprox. 2 mm de ancho en el soporte de diafragmas y diapositivas.
Luego insértelo entre la lente y el filtro de polarización inmediatamente detrás de la lente.
Alinee el filamento de la lámpara paralelamente a la ranura.
Se crea un haz de luz paralelo con la ayuda de la lente B y la ranura. Ajuste inicialmente el filtro de polarización a 0.
Empuje la mesa de óptica exactamente arriba del filtro.

Preparación de la hoja de papel

Doble la hoja de papel en el lado horizontal de manera que quede una banda de aproximadamente 2 cm de ancho apuntando hacia arriba.
Coloque la hoja en la mesa de óptica como se muestra en las Figuras 1 y 2.
Dibuje el eje óptico.
Coloque el cuerpo semicircular en la mesa de óptica como se muestra en la Fig. 2.

Método

Experimento 1

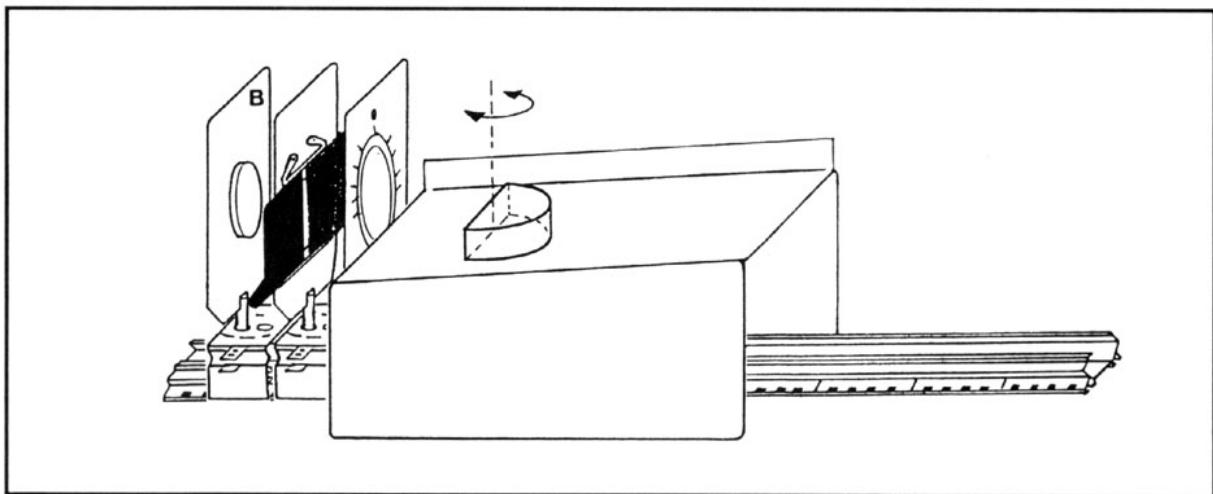


Fig. 2: Sección de la Fig. 1

Mesa de óptica con una hoja de papel blanco. El borde posterior ha sido doblado. Ahí puede observarse el punto en el cual pega la luz reflejada – aquí desde la superficie de nivel de un cuerpo semicircular.
Cuando el cuerpo semicircular esta en esta posición, se estudia un haz de luz polarizado en la transición del medio más translúcido al medio mas espeso ópticamente.

- Gire el cuerpo semicircular alrededor del eje mostrado en la Fig. 2
Observe el haz de luz reflejado en el borde de papel doblado.
- Luego, ajuste el filtro a 90°
- Gire el cuerpo semicircular como lo hizo anteriormente
- Al hacer esto, determine las intensidades luminosas del haz de luz que pega en el borde del papel..



- Determine el ajuste en el cual la intensidad luminosa es mínima.
- Vuelva a ajustar el filtro de polarización a 0. Marque el lugar donde pega el haz de luz.

Ingrese lo siguiente:

- El contorno del cuerpo semicircular
- El rayo incidente (con una flecha)
- El rayo reflejado (con una flecha)
- El rayo refractado (con una flecha)

Retire el filtro de polarización del sistema. Doble el borde del papel hacia abajo sin cambiar la disposición. Estudie el rayo reflejado con el filtro de polarización. ¿Qué propiedad tiene la luz reflejada?

Experimento 2

Haz de luz en la interfase vidrio acrílico/aire.

Prepare una segunda hoja de papel como en el Experimento 1 y colóquela en la mesa de óptica. Posicione el cuerpo semicircular como se indica en la Fig. 3.

Seleccione $\overline{AM} = \overline{BM}$

Gire el cuerpo semicircular alrededor del eje que pasa por M.

Proceda como en el experimento 1.

De la misma manera que para el experimento 1, registre los resultados del experimento en el papel.

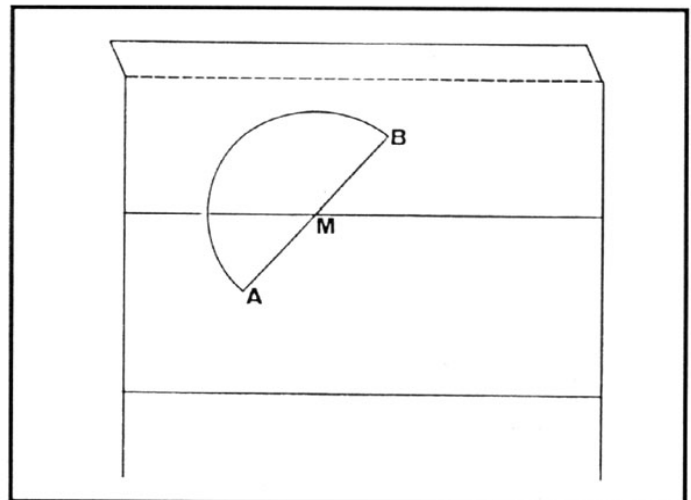


Fig. 3: Montaje de la mesa de óptica, proyección horizontal, como se muestra en la Fig. 1.

El cuerpo semicircular debe posicionarse de tal manera que el haz de luz ingrese intacto (esto aquí significa radialmente):

$$\overline{AM} = \overline{BM}$$

Esto permite observar la reflexión en la superficie de salida, es decir, en la interfase del medio más espeso ópticamente y del medio traslúcido.

Observación y evaluación

Reproduzca las observaciones en unas pocas líneas.

Formule los resultados del experimento.

La ley descubierta se conoce como ley de Brewster.

- ¿Cómo puede explicarse la ley si sabe que la propagación de la luz en los cuerpos transparentes se produce por medio de la excitación de los dipolos eléctricos?
- Este importante ángulo de incidencia, α_p , se conoce como ángulo de máxima polarización o ángulo de Brewster.

A partir de la ley hallada, deduzca una sencilla relación entre el ángulo de Brewster α_p y el índice de refracción.



Ley de Brewster

Objetivos Corroborar la ley de Brewster mediante experimentos.

Poder concluir lo siguiente a partir de la rectangularidad entre el rayo reflejado y el refractado:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= n & \alpha &= \text{Ángulo de incidencia (ángulo de máxima polarización)} \\ & & n &= \text{Índice de refracción} \end{aligned}$$

Aparatos

1 Raíl metálico de precisión, 50 cm	460 82	1 Mesa de óptica	459 15
2 Jinetillos con pinza	460 95	1 Cuerpo semicircular	459 45
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W	459 03	1 Par de cables, 50 cm, por ej.	
1 Lente B, f = 10 cm	459 62	rojos, azules.	501 45
1 Pantalla traslúcida	459 24	1 Fuente de voltaje de CA de 12 V	por ej. 562 73
2 Filtros de polarización	472 38	ó	522 16
		2 Hojas de papel blanco, DIN A5	

Observación

Experimentos 1 y 2

La luz polarizada en el plano de incidencia se refleja con diferentes grados de intensidad, dependiendo del ángulo de incidencia.

El rayo reflejado desaparece completamente a un cierto ángulo de incidencia.

La luz no polarizada reflejada bajo este ángulo aparece completamente polarizada.

Diagramas:

► Fig. 3 / Fig. 4

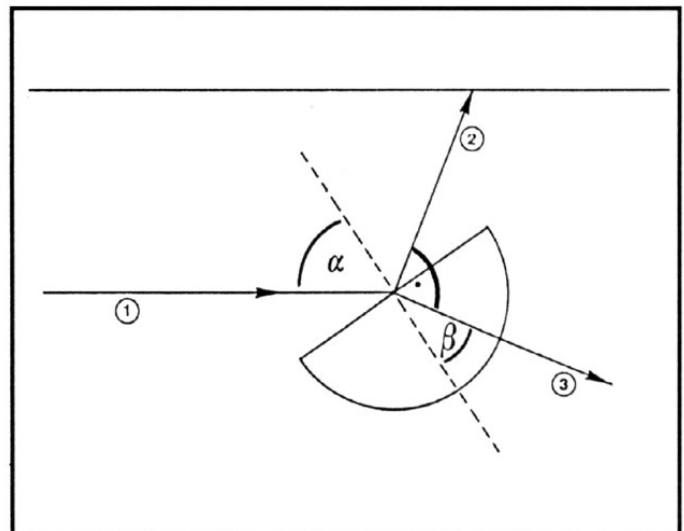


Fig. 4: Esquema del cuerpo semicircular, división del rayo incidente (1) en la interfase aire / plexiglás. El rayo reflejado (2) y el refractado (3) forman un ángulo recto. Bajo esta precondition, luz, el vector luminoso de la que oscila en el plano de incidencia, no se refleja. α_p = ángulo de máxima polarización (ángulo de Brewster) α_p (aire / plexiglás) = 56.3°



Puede observarse que el ángulo de incidencia preferido esta obviamente caracterizado por el hecho de que el rayo reflejado y el refractado forman un ángulo recto.

Ley de Brewster

Si la luz pega en un cuerpo transparente de tal manera que los rayos reflejado y refractado forman un ángulo recto, la luz reflejada esta completamente polarizada linealmente.

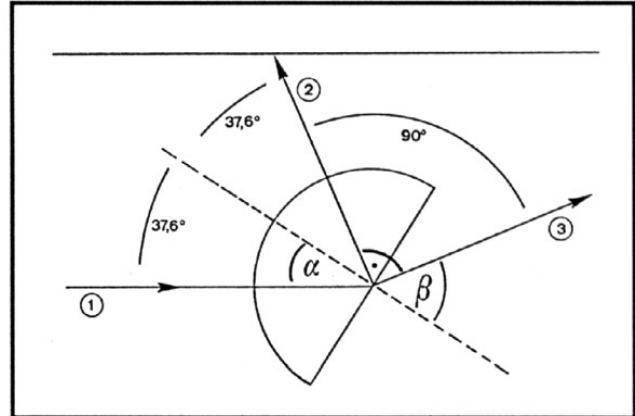


Fig. 5: Diagrama del cuerpo semicircular, división del haz (1) en la interfase plexiglás / aire.

El rayo reflejado (2) y rayo refractado (3) forman un ángulo recto.

Bajo esta precondición, luz, el vector luminoso de la que vibra en el plano de incidencia no se refleja.

α_p = ángulo de máxima polarización (ángulo de Brewster)

α_p (plexiglás / aire) = 37.6°

• *Explicación de la ley*

La luz es una onda electromagnética. Sus vectores E (vectores luminosos) muestran generalmente todas las direcciones de oscilación posibles. Cuando entra en un dieléctrico, por ej. plexiglás, los electrones allí contenidos son excitados para realizar oscilaciones forzadas en la dirección de los vectores E.

Por su parte, los electrones que oscilan emiten nuevamente ondas electromagnéticas, como un dipolo Hertz. De todas maneras, sabemos que no puede emitir ninguna onda en su eje longitudinal.

Como resultado, la luz cuyo vector E oscila en el plano de incidencia no puede estar contenida en el rayo reflejado si este último forma ángulos rectos con el rayo refractado.

Derivación de la relación entre α_p y n

► Fig. 6

Designaciones:

α_p = Ángulo de máxima polarización o ángulo de Brewster (= ángulo de incidencia en el cual la luz reflejada esta completamente polarizada linealmente)

β = ángulo de refracción

n = Índice de refracción

Lo siguiente se aplica de acuerdo a la ley de refracción:

$$\frac{\sin \alpha_p}{\sin \beta} = n \quad (I)$$

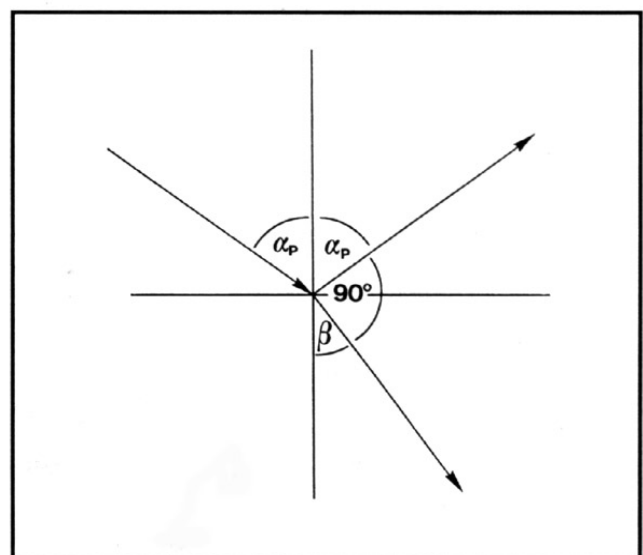


Fig. 6: Diagrama para derivar la relación $\text{tg } \alpha_p = n$



Los rayos reflejado y refractado forman entre si un ángulo recto cuando

$$\alpha_p + \beta = 90^\circ \blacktriangleright \text{Fig. 6}$$

ó

$$\beta = 90^\circ - \alpha_p$$

Sustituyendo en (I), resulta lo siguiente:

$$\frac{\sin \alpha_p}{\sin 90^\circ - \beta} = \frac{\sin \alpha_p}{\cos \alpha_p} = n, \text{ es decir,}$$

$$\text{ó} \quad \boxed{\text{tg } \alpha_p = n} \quad (\text{II})$$

$$\boxed{\alpha_p = \text{arctg } n} \quad (\text{III})$$

Ejemplo 1

$$n \text{ (aire - plexiglás)} = 1.49$$

Ángulo de máxima polarización:

$$\alpha_p = \text{arctg } 1.49 = 56.3^\circ$$

Ejemplo 2

$$n \text{ (plexiglás - aire)} = \frac{1}{n} = \frac{1}{1.45}$$

Angulo de máxima polarización

$$\alpha_p = \text{arctg } \frac{1}{n} = \text{arctg } \frac{1}{1.49} = 37.6^\circ$$

Nota:

- La ley de Brewster fue descubierta empíricamente en 1813 por David Brewster (1771 – 1868).

En 1817, Thomas Young concluyó a partir de la ley que la luz es una onda transversal.

- La ley de Brewster es un caso especial entre las leyes que determinan las intensidades luminosas de la luz polarizada con reflexión y refracción en medios transparentes. Las fórmulas de Fresnel describen con detalle las interrelaciones.



Polarización producto de la dispersión

Consigna Estudiar la luz que se propaga en el agua turbia

Aparatos

- 1 Banco de óptica, 0.5 m
- 5 Jinetillos con pinza
- 1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W
- 1 Lente B, $f = 10$ cm
- 1 Soporte para diapositivas y diafragmas
- 2 Filtros de polarización
- 1 Tapa de la caja para diapositivas (como soporte)

- 1 Cubeta de vidrio
- 1 Caja con espejos
- 1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojos, azules
- 1 Fuente de voltaje de CA de 12 V

Adicional:

- 1 Portaobjetos
- 150 cm³ de agua
- 2 gotas de leche

Montaje

► Fig. 1

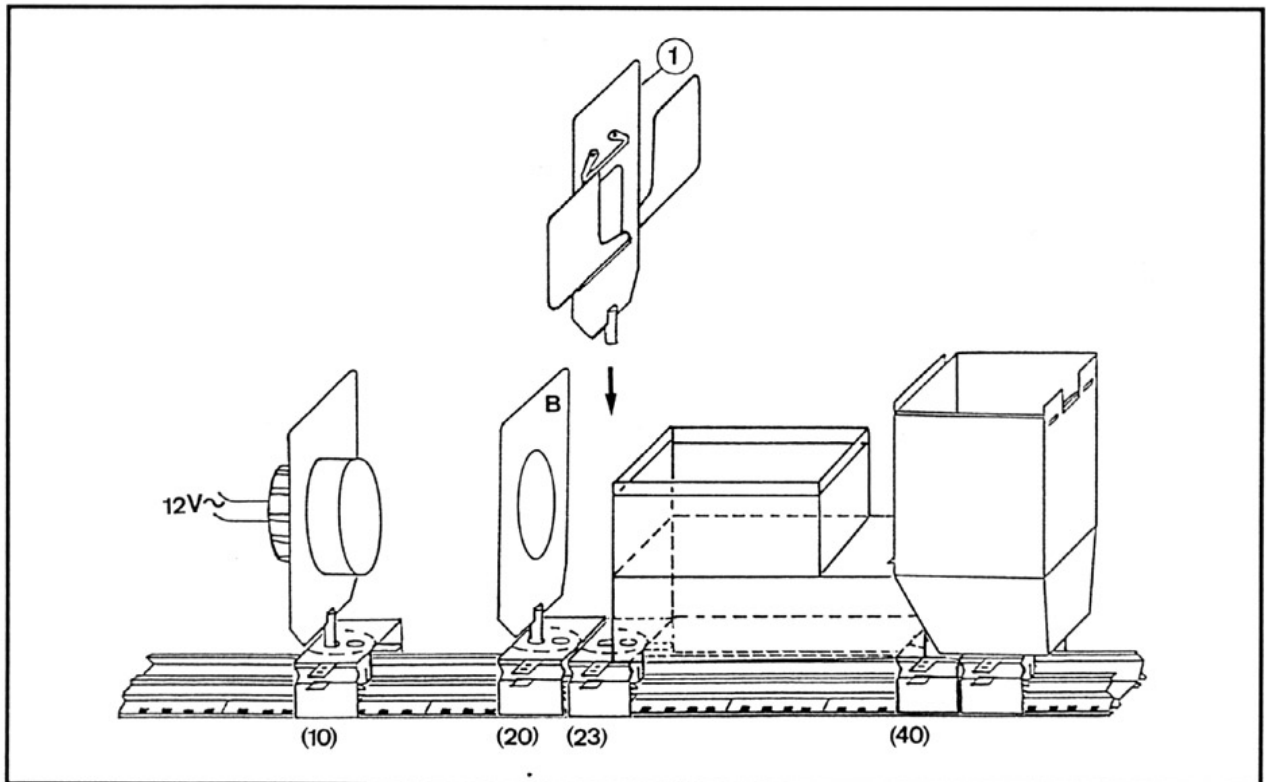


Fig. 1: Montaje del experimento para estudiar la propagación luminosa en agua turbia.

(1) Soporte para diapositivas y diafragma con deslizadores de diafragma insertados.

La tapa de la caja para diapositivas hace de base para la cubeta de vidrio de espejo.

Las acanaladuras en los jinetillos evitan que la tapa se deslice.

Llene la cubeta con agua hasta justo debajo del borde y – ver Fig. 1 – colóquela arriba de la tapa de la caja para diapositivas.

Oscurezca ligeramente el ambiente!



Método

Experimento 1

Pregunta: ¿Se modifica la luz que pasa por el agua turbia sin refractarse?

Muy gradualmente, haga turbia el agua usando leche.

Para hacer esto, esparza un poco de leche, por ejemplo, en el extremo de un portaobjetos y úselo para revolver el agua.

Observe en la caja con espejos la luz que pasa.

Siga enturbiando el agua hasta que el filamento de la lámpara apenas pueda reconocerse en la caja con espejos.

Luego coloque la cubeta de vidrio en el recorrido del haz en forma transversal.

Amplíe gradualmente la trayectoria de la luz a través del agua turbia girando la cubeta de vidrio.

Experimento 2

Pregunta: ¿Presenta la luz difusa propiedades particulares?

Ajuste un deslizador de diafragma a cada lado del soporte de diafragmas y diapositivas como se muestra por (1) en la Fig. 1.

Haga una ranura de aprox. 1 cm de ancho. Inserte el soporte de diapositivas y diafragmas en el jinetillo inmediatamente enfrente de la cubeta de vidrio, como se muestra en la Fig. 1

Mueva la lámpara de tal manera que se pueda ver en el agua turbia un haz de luz perfectamente limitado.

Con ayuda del filtro de polarización (2), estudie la luz difusa que se emite fuera de la cubeta de vidrio desde la parte superior y desde los costados.

Ensanche la ranura para estudiar la luz emitida a los costados.



Experimento 3

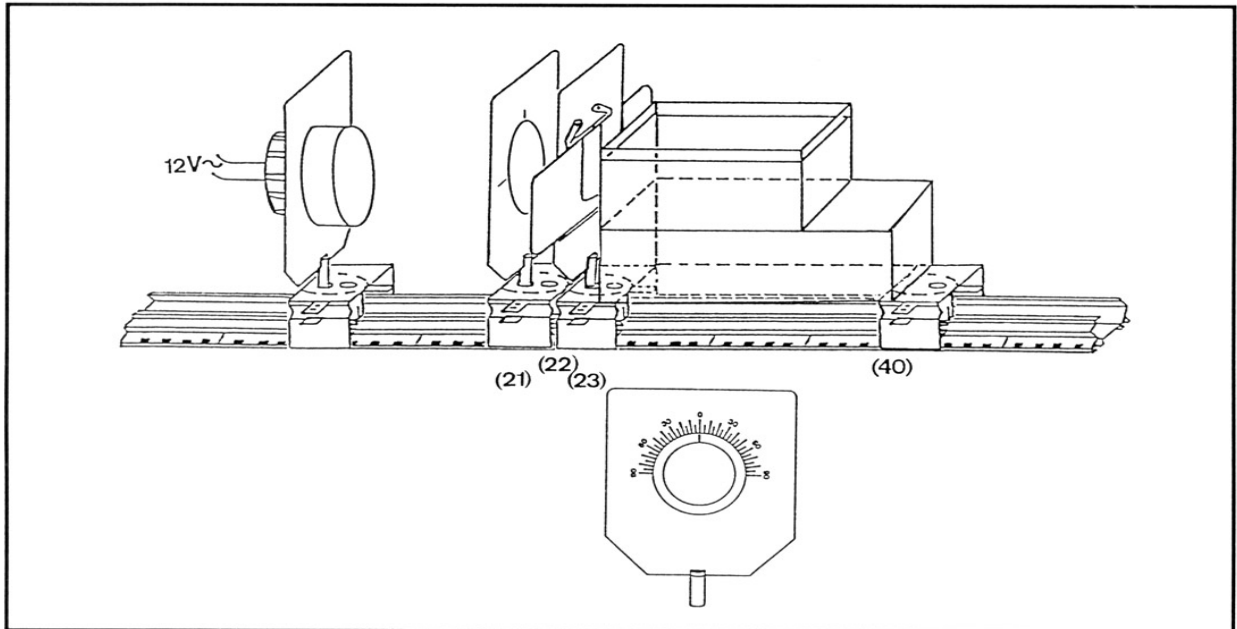


Fig. 2 Armado del experimento para investigar la luz polarizada en el agua turbia

(20): Filtro de polarización

(22): Soporte de diafragmas y diapositivas con deslizadores como se muestra en (1) en la Fig. 1

Pregunta: ¿Tiene alguna dirección privilegiada la luz de la lámpara que pasa a través del agua turbia?

Retire la cubeta de vidrio. Estudie la luz que pasa directamente a través del agua turbia utilizando el filtro de polarización.

Experimento 4

Pregunta: ¿Como se comporta la luz polarizada que penetra en el agua turbia?

Modifique el armado como se muestra en la Fig. 2. Ahora hay un filtro de polarización ubicado en la posición (21).

Seleccione diversos ajustes (0, 45, 90).

Usando un segundo filtro de polarización, estudie la luz que emerge del agua turbia desde la parte posterior, superior y de los costados.

Experimento 5

Pregunta: ¿Se puede atribuir el color del cielo a la difusión de la luz solar?

Observe el cielo en ángulos rectos a la dirección de la luz solar por medio de un filtro de polarización.

Gire el filtro de polarización.



Ficha de trabajo del estudiante 4

Observaciones y explicaciones



Polarización producto de la difusión

Objetivos

Poder mostrar que

- la luz que pasa a través del agua turbia toma un color rojizo.
- la luz difusa en el agua turbia esta polarizada

Aprender que la luminiscencia en la puesta del sol y el azul del cielo se deben a la difusión de la luz en la atmósfera.

Aparatos

1 Raíl metálico de precisión, 0.5 m	460 82
5 Jinetillos con pinza	460 95
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W	459 03
1 Lente B, f = 10 cm	459 62
1 Soporte para diapositivas y diafragmas	459 33
2 Filtros de polarización	472 38
1 Tapa de la caja con diapositivas (como base) de	442 89
1 Cubeta de vidrio	447 02
1 Caja con espejos	459 17
1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojo, azul	501 45
1 Fuente de voltaje de 12 V por ej. transformador 6 V/12 V; 30 W	562 73
ó fuente de alimentación de voltaje extra bajo, 3 A	522 16

Adicional:

1 Portaobjetos de	662 093
150 ml de agua	
2 gotas de leche	

Montaje

Los deslizadores deben empujarse hacia el soporte de diafragmas y diapositivas de una manera inusual para lograr un límite inferior mas alto del haz de luz.

Observaciones y evaluaciones

Experimento 1

Al aumentar la nebulosidad, la luz que pasa cambia su color de amarillo a rojo amarillento.

Si se extiende el trayecto de la luz en el medio nebuloso el color de la luz que pasa por él cambia de amarillo a rojo amarillento.

El mismo fenómeno puede observarse en el ocaso (luminiscencia de la puesta del sol).



Experimento 2

La luz difusa esta polarizada.

El vector luminoso vibra perpendicularmente a la dirección de propagación del haz de luz.

► Fig. 3

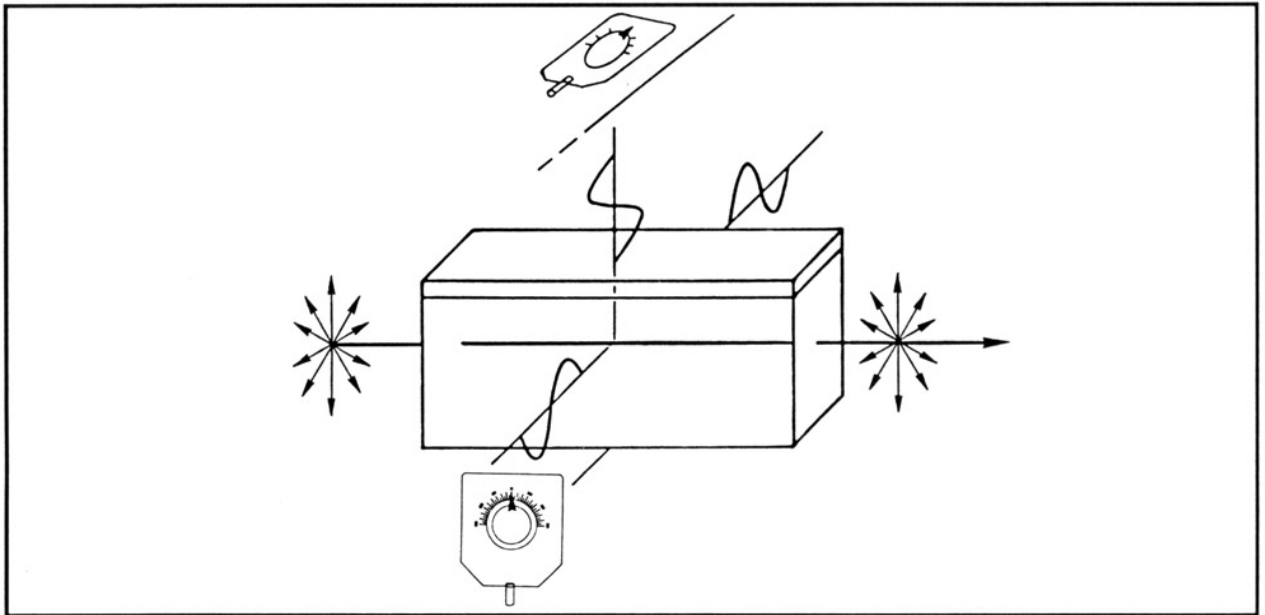


Fig. 3: Diagrama para aclarar la posición de vibración de la luz difusa polarizada.

El haz de luz que penetra en el medio nebuloso no está polarizado y se mantiene no polarizado aún después de pasar a través del agua turbia.

La luz difusa que emerge perpendicular al haz de luz vibra en planos que son siempre perpendiculares al haz de luz.

Experimento 3

La luz que ha pasado directamente a través del agua turbia no está polarizada.



Experimento 4

La luz polarizada que ingresa en el agua turbia no cambia su dirección de vibración. La luz difusa sólo emerge del agua turbia perpendicular al plano de vibración de la luz polarizada.

► Fig. 4

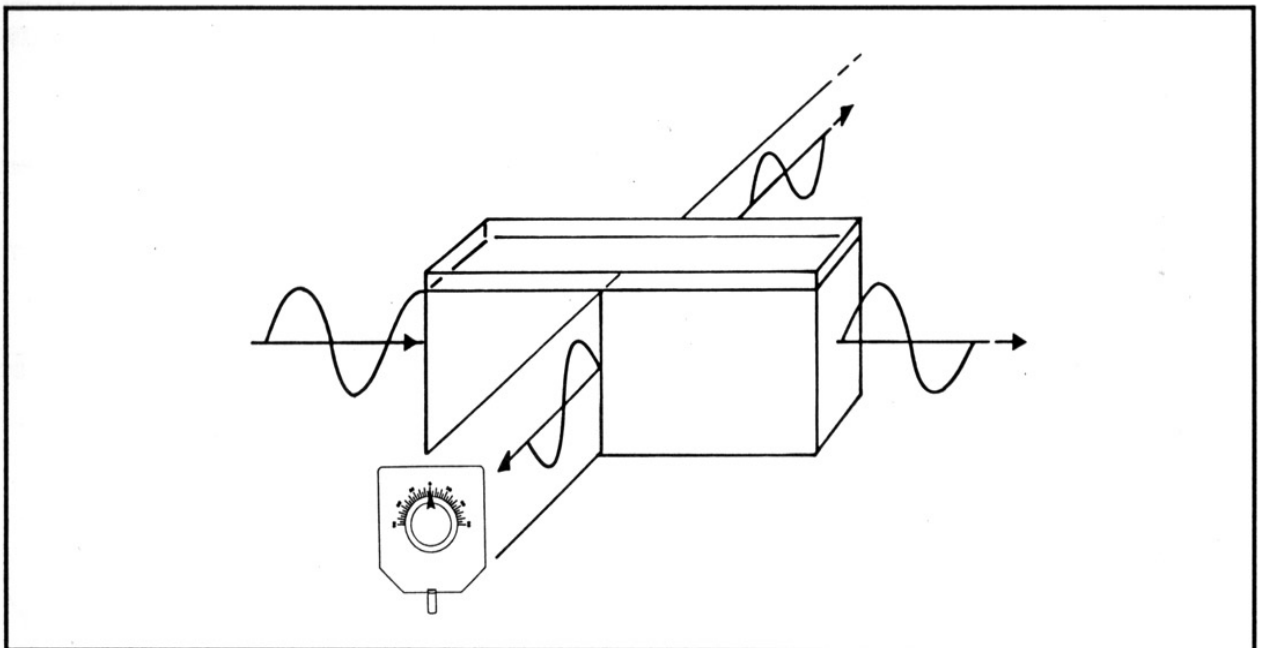


Fig. 4: Diagrama para aclarar la dirección constante de vibración de la luz polarizada al pasar a través del agua turbia. La luz difusa emerge del agua turbia perpendicularmente a la dirección de propagación. No se observa luz difusa en la dirección de vibración.

Experimento 5

La luz del cielo presenta una dirección de vibración preferida perpendicular a la dirección de los rayos del sol. Esto es típico para la difusión.

Nota:

- El fenómeno por el cual un haz de luz se torna visible en un medio nebuloso se conoce como Efecto Tyndall o Fenómeno de Tyndall en honor al físico británico John Tyndall (1820 – 1893). Trata de la difusión de la luz.
- La difusión de la luz consiste en una luz incidente que excita pequeñas partículas (dipolos). Éstos emiten preferentemente luz perpendicular al plano de vibración y no emiten luz en la dirección de vibración.



Información para el profesor 4

- La polarización de la luz del cielo azul prueba que incluso el azul del cielo es originado fundamentalmente por la difusión de la luz y no por la difracción.

Con respecto a la teoría: tanto la intensidad de la luz difractada en finas partículas como la intensidad de la luz difusa son inversamente proporcionales a la 4ta. Potencia de la longitud de onda.

Puesto que las longitudes de onda del azul espectral y del rojo espectral tienen una relación de aproximadamente 1:2, el azul en la luz difusa (y también en la luz difractada) es aproximadamente 16 veces más intenso que el rojo que queda predominantemente en la luz que pasa por el medio.

La diferencia de color aumenta al disminuir el tamaño de las partículas.

Esto significa que el cielo aparece con un azul profundo cuando el aire es particularmente puro en las altas montañas o en la sabana Africana.

En contraste, la nebulosidad aparece cada vez más blanca cuanto mayor sea el tamaño de las partículas (niebla, leche, vidrio opal).

- En el experimento aquí descrito con leche como el medio nebuloso, el colorido azul de la luz difusa no puede mostrarse convincentemente ya que las partículas no son lo suficientemente pequeñas.

Un medio nebuloso mejor:

3 gr. de colofonia en 50 cm³ de alcohol. Agregue un poco al agua.

El agua turbia es utilizable para el experimento durante aproximadamente 1 hora.

Las partículas finas se juntan entre sí gradualmente y se hunden al fondo.



Actividad óptica Polarimetría (sacarimetría) – dispersión rotatoria

Consignas Construir el modelo de un sacarímetro.

Estudiar el cambio en la dirección de oscilación de la luz polarizada en una solución con azúcar dependiendo de

- La concentración de la solución
- La longitud del camino óptico en la solución y
- La longitud de onda de la luz

Aparatos

- 1 Banco de óptica, 05 m
- 5 Jinetillos con pinza
- 1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W
- 1 Lente B, $f = 10$ cm
- 1 Soporte para diapositivas y diafragmas
- 1 Filtro del rojo
- 2 Filtros de polarización

- 1 Tapa de la caja con diapositivas (como soporte)
- 1 Cubeta de vidrio
- 1 Caja con espejos
- 1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojos, azules
- 1 Fuente de voltaje de CA de 12 V
- 1 Vaso de precipitados de vidrio con pico, 250 ml
- Agua con glucosa

Montaje

- Fig. 1, sin el filtro del rojo (2)
- Polarizador P_1 en 90°
- Analizador P_2 en 0°

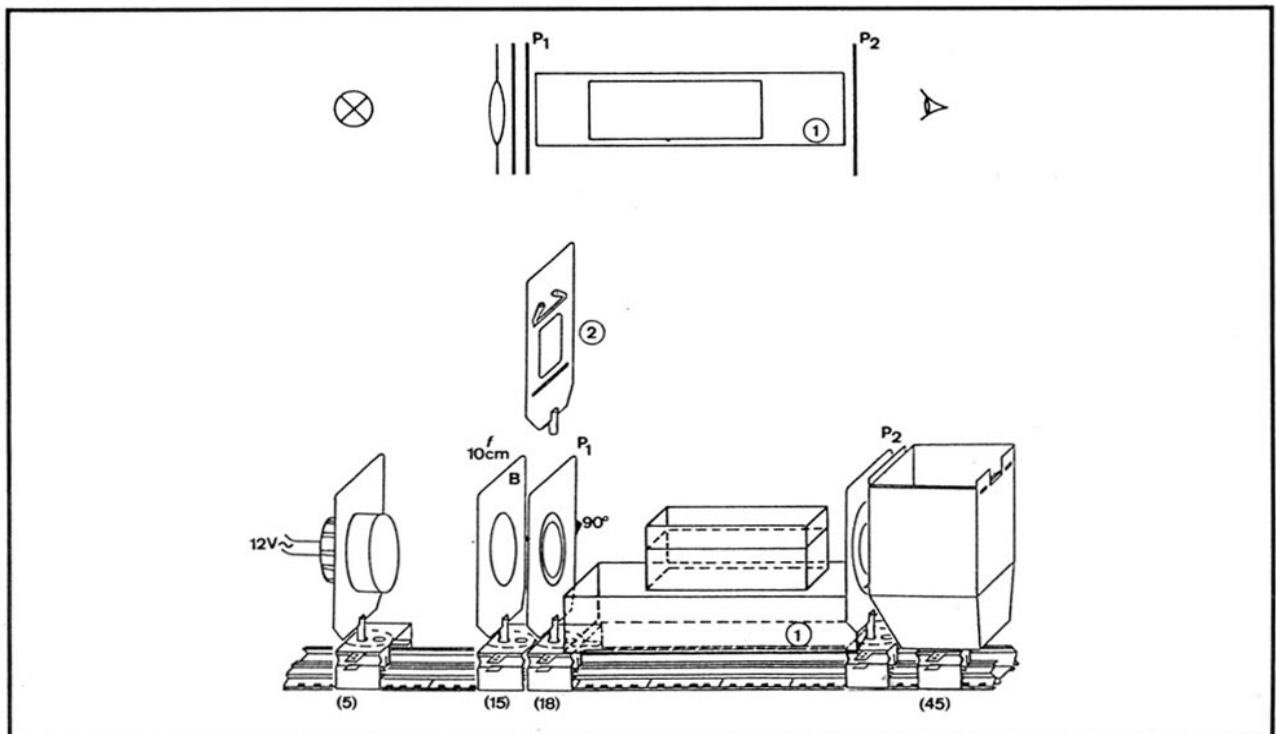


Fig.1: Armado del experimento: Modelo de un sacarímetro,

(1) tapa de la caja con diapositivas

(2) soporte para diafragmas con filtro del rojo

Para trabajar con luz monocromática: filtro de color (por ej. filtro del rojo) entre la lente B y el analizador P_1



¿En que lado de la caja con espejos se puede ver la cubeta de vidrio?
Pídale al docente solución de glucosa.

Experimento 1

Llene aproximadamente $\frac{3}{4}$ de la cubeta de vidrio con glucosa.
Gire el filtro del analizador P_2 en el marco.

Experimento 2:

Inserte el soporte para diafragmas con el filtro del rojo (2) (► Fig. 1) entre P_1 y P_2 .

¿En que ángulo entre -90° y $+90^\circ$ puede observarse algo especial?

Coloque la cubeta de vidrio transversalmente.

¿Cómo varía el recorrido de la luz cuando realiza esto?

¿Qué cambio se observa en la luz que emerge de la solución con azúcar?

¿Qué otras trayectorias de la luz en la solución con azúcar son posibles si se tienen dos cubetas de vidrio?

Experimento 3

Reduzca a la mitad la concentración de la solución con azúcar.

Sítue la cubeta de vidrio longitudinalmente como se indica en la Fig. 1.

¿Cuan grande debe ser ahora el ángulo en el analizador P_2 de manera que se absorba la mayor cantidad posible de luz en el montaje (P_1 , solución con azúcar, P_2)?

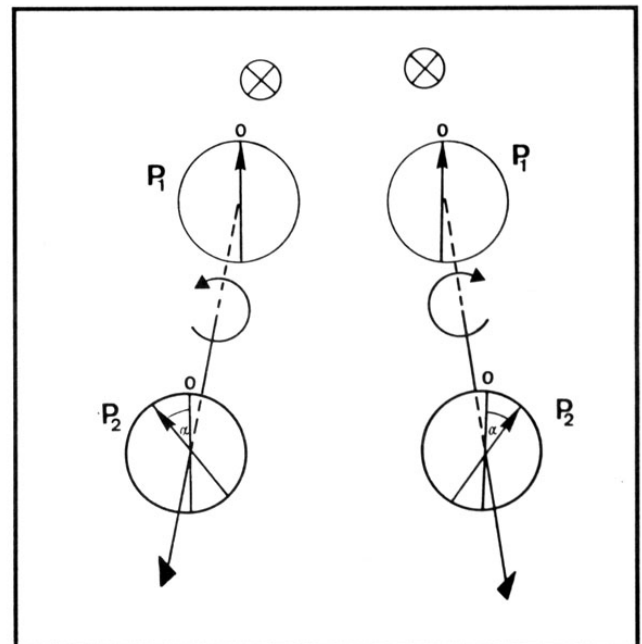


Fig. 2: Diagrama para girar el vector luminoso
Izquierda: Rotación en sentido antihorario
Es decir, antihorario cuando se mira hacia la fuente luminosa = rotación positiva (cuando se observa el ángulo en el sentido matemático mirando en la dirección de propagación de la luz).
Derecha: Sentido horario
Es decir, horario cuando se mira hacia la fuente luminosa = rotación negativa.

Evaluación

- ¿Qué influencia tiene la solución con glucosa en la luz polarizada?
¿Qué relaciones pueden observarse en los experimentos 2 y 3?
- ¿De donde proviene el nombre Dextrorso para ciertos tipos de glucosa (latín: dextra = derecha)
► Fig. 2
- El método de determinar el contenido de azúcar de una solución con la ayuda de la luz polarizada se conoce como sacarimetría.
¿En que se basa este método?



Ficha de trabajo del estudiante 3

- ¿Cómo puede explicarse el color de la luz en el experimento 1?
Esta dispersión de color conocida como “dispersión rotatoria” puede compararse con la dispersión de color a través de un prisma.

Actividad óptica Polarimetría (sacarimetría) – dispersión rotatoria

Objetivos Construir un modelo de un sacarímetro y poder explicar su método de funcionamiento.

Conocer la dependencia del ángulo rotacional a los siguientes parámetros:

- Concentración de la solución
- Longitud del camino óptico en la solución
- La longitud de onda de la luz

Saber que hay sustancias que rotan hacia la izquierda y hacia la derecha.

Comprender el término dispersión rotatoria.

Aparatos

1 Raíl metálico de precisión, 0.5 m.	460 82	1 Cubeta de vidrio	477 02
5 Jinetillos con pinza	460 95	1 Caja con espejos	459 17
1 Lámpara tubular, 12 V, 18 W	459 03	1 Par de cables, 50 cm, por ej. rojos, azules.	501 45
1 Lente B, f = 10 cm	459 62	1 Fuente de voltaje de CA de 12 V	por ej. 562 73
1 Soporte para diapositivas y diafragmas . .	459 33	1 Vaso de precipitados de vidrio, 250 ml	664 103
1 Filtro del rojo	de 467 95		
2 Filtros de polarización	472 38		
1 Tapa de la caja de diapositivas (como soporte)	de 442 89		

Por grupo de trabajo:

- 200 ml de agua
- 20 gr. de glucosa (Dextrosa)

Preparación del experimento

Solución de glucosa a preparar por el profesor

Cantidad de agua = 100 ml x número de grupos de trabajo

Disuelva 20 gr. de glucosa por cada 100 ml de agua

Entregue a los grupos la solución de glucosa en las cubetas de vidrio.

Observaciones

La cubeta de vidrio puede verse en la caja con espejos en el lado izquierdo.

Experimento 1

Cuando el filtro de polarización P_2 se gira entre 0° y aprox. $+20^\circ$, aparecen colores en la secuencia azul-verde, magenta, naranja.

Esta disposición permite a la luz pasar en todos los ángulos.

Experimento 2

En la caja con espejos, la mitad derecha de la imagen aparece oscura y la mitad izquierda clara. En la izquierda se puede ver la luz que pasa por la solución.

La solución de glucosa reduce la absorción de la luz de los filtros de polarización cruzados.

Cuando se mira hacia la fuente luminosa, el analizador P_2 debe girarse aproximadamente 10° hacia la derecha (es decir, en el sentido de las agujas del reloj) de manera que la luz que ha pasado por la glucosa muestre una intensidad mínima. Cuando la concentración de azúcar se reduce a la mitad, el ángulo rotacional es igual a la mitad (5°).



Experimento 3

Cuando la cubeta de vidrio se coloca transversalmente, la trayectoria de la luz es sólo igual a la mitad (10 cm).

El ángulo rotacional es también igual a sólo la mitad.

Nota

Las trayectorias de luz de 10, 20, 30, 40 cm son posibles con 2 cubetas de vidrio.

Evaluación

- La solución de glucosa hace rotar el plano de vibración de la luz.
Los experimentos muestran que el ángulo de rotación se duplica si la concentración o el recorrido de la luz se duplican.
- La dextrosa designa al azúcar que gira hacia la derecha. ► Fig. 2
También hay azúcares que giran hacia la izquierda (sinistrosas).
- La sacarimetría se vale del hecho de que una solución con azúcar hace girar el plano de la luz polarizada dependiendo de la concentración.
- Explicación de la crominancia de la luz en el experimento 1:
El ángulo rotacional es función de la longitud de onda λ de la luz
Para los ángulos que muestran luz colorida, no se permite cierto color de la luz blanca en cada caso. La luz que es permitida a pasar con todas las otras longitudes de onda puede verse en el color complementario.

α	Color (monocromático) no permitido	Color mixto permitido
10°	Rojo	Azul-verde
-15°	Verde azulado	Magenta
-20°	Azul	Naranja

El resultado es que el plano de oscilación es girado en mayor parte por la luz azul de onda corta que por la luz roja de onda larga.

- En el caso de la dispersión cromática de la luz blanca debido a la denominada dispersión rotatoria, la luz se dispersa hacia diferentes direcciones de oscilación de acuerdo con su longitud de onda.
En el caso de la dispersión cromática de la luz blanca a través de un prisma, la luz se refracta en grados variables dependiendo de su longitud de onda, es decir, se dispersa en diferentes direcciones de propagación.

**Notas**

- Los materiales que hacen rotar el plano de polarización cuando una onda luminosa pasa por ellos se conocen como ópticamente activos.
- La teoría de Fresnel presenta la onda polarizada antes que ingrese en el material ópticamente activo como superposición de dos ondas polarizadas circularmente con la misma frecuencia y amplitud. La rotación del plano de polarización se explica por dos velocidades de fase diferentes para la onda circular izquierda y la circular derecha.
- La actividad óptica natural en el estado no cristalino se determina por la asimetría de las moléculas. En los materiales cristalinos, la actividad óptica se produce por una disposición especial de las moléculas en la rejilla.
- El método de determinar la concentración de un material disuelto con ayuda de la luz polarizada se conoce como polarimetría, o sacarimetría si se utiliza azúcar.

Lo siguiente se aplica en general a las soluciones ópticamente activas:

$$\alpha = [\alpha] \cdot c \cdot d$$

$[\alpha]$ = Rotación específica

c = Concentración

= Cociente de la masa del material disuelto y el volumen de la solución

d = Longitud de onda de la luz en la solución

- Recomendación para estudiar la actividad óptica en cristales:
Cuarzo, rotación en sentido de las agujas del reloj (472 64)
Cuarzo, rotación en sentido inverso a las agujas del reloj (472 65)
En el caso del cuarzo, la rotación del plano de oscilación en función de la longitud de onda – la dispersión rotatoria – es particularmente grande.
- De acuerdo a Biot, una ecuación del tipo

$$\alpha = \frac{A}{\lambda^2} + \frac{B}{\lambda^4}$$

se aplica a la dependencia del ángulo de rotación a la longitud de onda λ .

A y B son constantes del material.



Aparatos requeridos

Numero maximo	Designacion	Cat. No.	Cantidad requerida en el experimento										Cantidad de juegos de aparatos STM				
			1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.0	5.0	OP1	OP3	OP7	OP8	
1	Raíl metálico de precisión, 0.5 m	460 82	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-
5	Jinetillos con pinza	460 95	2	4	3	2	2	3	2	2	5	5	4	-	-	-	1
2	Filtros de polarizacion	472 38	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	-	-	-	-	2
1	Pantalla traslúcida	459 24	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-
1	Tabla de óptica	459 15	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-
1	Base aislante en el jinetillo	590 87	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	Caja con espejos	459 17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-
1	Caja para diapositivas (como soporte)	442 89	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1
1	Cubeta de vidrio	477 02	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1
1	Soporte para diapositivas y diafragmas	459 33	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-
1	Paquete de 50 portaobjetos	662 093	-	-	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	1
									(15 ea.)								
1	Pantalla de vidrio acrílico	459 23	1	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
1	Objeto fotoelástico	471 94	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
1	Cuerpo semicircular	459 45	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-
1	Lente B, f = 10 cm	459 62	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
1	Filtro del rojo	467 95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-
1	Lámpara tubular 12 V / 18 W	459 03	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
3	Par de cables, 50 cm, por ej. rojo, azul	501 45	-	3	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
1	Cable, 25 cm, por ej. azul	501 44	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	Fuente de voltaje 9 V-/ 9 V~/ 12 V~ Fuente de alimentación de voltaje extra bajo de 3 A o Transformador, 6/12 V~ 30 W	522 16 (562 73)	- (-)	1 (1)	- (-)	- (-)	- (-)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)					
1	Amperímetro, 3mA, por ej. Multímetro M2H-LH	531 552	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-					
2	Sección de tablero de zócalo	476 71	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-					
1	Fotoresistor LDR 0.5	578 02	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-					
1	Resistor kΩ	577 44	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-					
1	Diodo Zener ZPD 6.2	578 55	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-					
1	Vaso de precipitados, 250 ml por ej	664 103	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1					



Numero maximo	Designación	Cat.No.	Cantidad de items requeridos en el experimento									
			1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.0	5.0
<i>Para lograr el vidrio rápidamente enfriado</i>												
1	Mechero de gas butano	666 711	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
1	Cartucho de gas butano (paquete de 3)	666 712	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
1	Tenazas de crisol	303 68	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>Recomendado</i>												
1	Vidrio rapidamente enfriable	471 61	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
	Papel de aluminio, 10 x 12 cm aprox.		-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
	Cinta adhesiva, en cm		-	-	40	-	-	-	10	-	-	-
	Agua, en ml		-	-	-	-	-	-	-	-	150	200
	Leche, en gotas		-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
	Glucosa		-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
	Regla, vaso de plástico, Hoja de empaquetado }		1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Resumen de los Módulos de Física STM

Área temática	Manuales de experimentación		Juego de equipos del experimento Número de catálogo y abreviación
	Grupo de tópicos	Cantidad de experimentos	
Mecánica			
Propiedades de la materia	37	589001	ME 1 (588 50) + ME 2 (588 51)
Fuerzas	41	589011	ME 1 (588 50) + ME 3 (588 52) + ME 4 (588 53)
Máquinas simples	38	589021	ME 1 (588 50) + ME 4 (588 53) + ME 5 (588 54)
Fluidos	30	589031	ME 1 (588 50) + ME 2 (588 51) + ME 6 (588 55)
Movimiento lineal	26	589041	ME 7 (588 56)
Oscilaciones	52	589071	ME 1 (588 50) + ME 8 (588 72)
Ondas	14	589081	
Calor			
Expansión y propagación del calor	26	589051	CA 1 (588 57) + CA 2 (588 58)
Energía calórica y estados de la materia	25	589061	CA 1 (588 57) + CA 3 (588 59)
Magnetismo • Electricidad • Electrónica			
Magnetismo	22	589111	MAG 1 (588 60)
Circuitos eléctricos simples	47	589121	EL 1 (588 61) + EL 2 (588 62)
Electromagnetismo e Inducción	43	589131	EL 1 (588 61) + EL 3 (588 63)
Electroquímica	20	589141	EL 1 (588 61) + EL 4 (588 64)
Electroestática 1: Cargas y fuerzas	59	589161	ESA 1 (588 73)
Electroestática 2: Cargas y campos	40	589171	ESA 1 (588 73) + ESA 2 (588 74)
Electrónica básica	48	589151	EL 1 (588 61) + EL 5 (588 65)
Óptica geométrica			
Propagación y Reflexión de la luz	46	589201	OP 1 (588 66) + OP 2 (588 67)
Refracción y Lentes	49	589211	OP 1 (588 66) + OP 3 (588 68)
Instrumentos ópticos	39	589221	OP 1 (588 66) + OP 4 (588 69)
Experimentos con la fuente de rayos luminosos	40	589231	OP 5 (588 70)
Óptica ondulatoria			
Difracción	24	589251	OP 1 (588 66) + OP 7 (588 75)
Interferencia	10	589261	OP 1 (588 66) + OP 7 (588 75)
Polarización	30	589271	OP 1 (588 66) + OP 8 (588 76)
Física nuclear			
Radioactividad	Ca. 32	589501	RAD 1 (588 77)
Informática / Tecnología digital			
Operaciones lógicas básicas	15	571171	P 1 (571 011)
Circuitos de combinación y de secuencia	20	571171	P 1 (571 011) + P 2 (571 022)