

Las peripecias del viaje de la luz

Manual gráfico de demostraciones experimentales

Autores

Alejandro Vásquez Arzola (responsable)

Natsuko Rivera Yoshida

Hernando Magallanes González

Karen Volke Sepúlveda

Pablo Adrian Hernandez Munguia

Luisa del Carmen García Canseco

Berenice García Rodríguez

Félix Esteban Torres González

Brandon Alejandro Reyes Ferrer

Javier Tello Marmolejo

Jordan Estrada Morales

Karla Corina Hernández Ramos

Samuel Amat Shapiro

Argelia Balbuena Ortega

Rubén Darío Muelas Hurtado

Índice

.....	1
AGRADECIMIENTOS.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
ESPEJISMOS, FIBRAS ÓPTICAS Y MÁS.....	5
FORMACIÓN DE IMÁGENES.....	10
LA LUZ COMO UNA ONDA Y SU POLARIZACIÓN.....	14
INTERFERENCIA, DIFRACCIÓN Y EL PUNTO DE ARAGO.....	19
LA LUZ Y EL COLOR.....	24
EL COLOR DEL CIELO.....	31
FLUORESCENCIA Y FOSFORESCENCIA.....	35
OBSERVANDO UN ZOOLÓGICO DE MICROORGANISMOS EN UNA GOTA.....	40
SCHLIEREN.....	44
GALERÍA DE FOTOS.....	47
VOLANTES EXPLICATIVOS.....	52

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera importante a todos los estudiantes que en años anteriores han participado en los eventos de divulgación que hemos organizado. Este trabajo es también el resultado de todas esas experiencias previas. En particular, agradecemos la participación de los siguientes estudiantes: M. Yadira Salazar Romero,, Sebastián Bucio Pacheco, Jaime Donlucas Pérez, Hugo Harleston Aguirre, Reynaldo J. Ortiz Guerrero, Laura Pérez García, Adrián Bartolo González, Monserrat Álvarez Ortiz, Enrique Puga Cital, Erick Estuardo Rodríguez Salas, Santiago López Huidobro, Jorge E. H. Cardoso Sacamoto, Emma Celina Brambila, Yareni Ayala y Andrés de los Ríos Sommer.

Agradecemos el apoyo brindado por el laboratorio de alto vacío y películas delgadas a cargo de Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez Flores-Alonso, quien aluminizó el espejo cóncavo que sirvió para la realización del experimento del efecto Schlieren. También agradecemos a los alumnos Sofía Ixchel Michaelian Martínez y Sebastián Bucio Pacheco, quienes nos apoyaron en la presentación de los experimentos en la Fiesta de las Ciencias y las Humanidades 2019. Igualmente agradecemos el apoyo de la unidad de comunicación, a los alumnos y en particular a Aleida Rueda Rodríguez, por su apoyo permanente en todas las actividades de divulgación realizadas.

Agradecemos el financiamiento a través del proyecto de Apropiación Social del Conocimiento CONACYT: "Las peripecias del viaje de la luz y sus consecuencias" (No. 298067). Igualmente agradecemos el financiamiento con el proyecto de investigación DGAPA-PAPIIT: "Estudio experimental de la dinámica de partículas brownianas autopropulsadas en campos de fuerzas externos" (No. IN111919).



PRESENTACIÓN

La luz y sus diferentes manifestaciones son quizás uno de los fenómenos que más han fascinado a la humanidad. Es en parte a través de la luz y de las imágenes de los objetos que nos rodean que podemos conocer nuestro entorno más allá de lo puramente palpable. Las estrellas en el espacio infinito, el color del cielo, la formación de los arcoiris, nuestro reflejo en un espejo o en el agua, son solo algunos de los fenómenos que tanto nos han maravillado desde una edad temprana. Este manual no pretende hacer una exposición rigurosa de los fenómenos relacionados con la luz, en su lugar simplemente invita al lector a que mire de manera más curiosa su entorno. En este manual se presentan experimentos clásicos que, por muy simples que parezcan, contribuyeron de forma importante al desarrollo de la ciencia moderna. La exposición y el material utilizado están pensados para que los experimentos puedan ser replicados de forma simple.

ESPEJISMOS, FIBRAS ÓPTICAS Y MÁS

Objetivo: Mostrar los fenómenos de reflexión y refracción de la luz. Ilustrar la reflexión total interna y cómo influye en algunos fenómenos naturales y en la tecnología, por ejemplo, en la formación de los espejismos y en la transmisión de información en las fibras ópticas.

Introducción: Es fácil convencerse a uno mismo que la luz viaja en línea recta, basta mirar la luz que pasa a través de algún pequeño orificio en un cuarto oscuro o ver la trayectoria de la luz que sale de un apuntador láser. Esto no es así cuando la luz incide sobre algún objeto transparente, en donde podemos observar la reflexión y la refracción que hacen que la luz se desvíe de su camino original. Estos fenómenos se deben al cambio de índice de refracción o, de manera más precisa, al cambio en la velocidad de la luz al pasar de un medio a otro.

Experimento 1: Reflexión y refracción en un cubo de agua. Llena un recipiente transparente con agua, que puede ser un vaso de agua grande o el recipiente de acrílico que se muestra en la imagen. Apuntando el láser desde arriba observa las múltiples refracciones y reflexiones de la luz entre el aire y el agua. Apuntando desde abajo observarás la reflexión total interna en la frontera agua-aire al aumentar el ángulo con el que incide el láser.

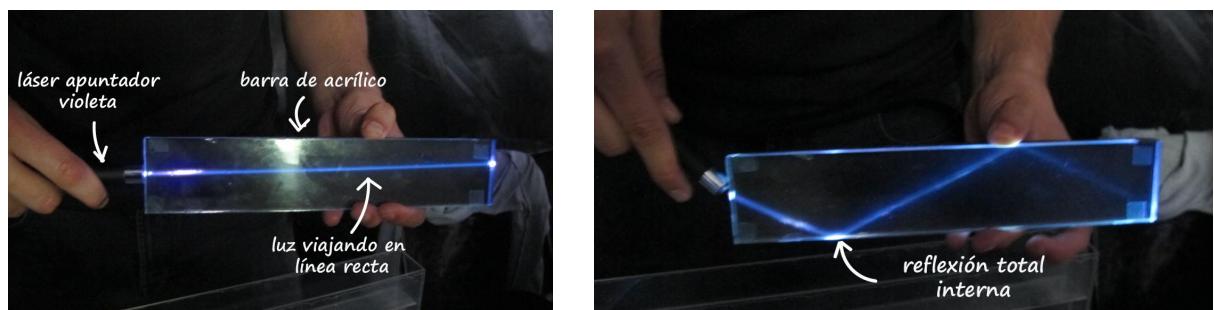




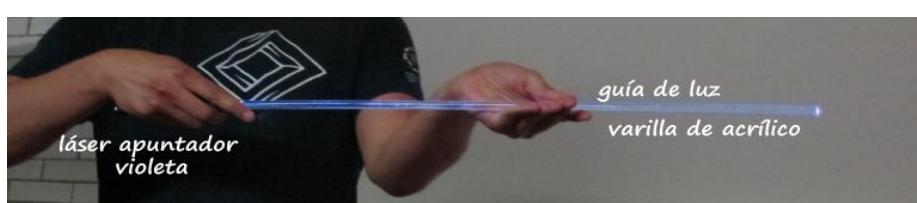
Ejemplos:

- Mira hacia arriba desde adentro de una alberca o desde adentro del mar. Si el agua está calmada, observarás una especie de ventana circular por la que puedes ver hacia el exterior rodeada por un espejo.
- Fíjate en los gogles de alguna persona en el interior del agua.
- Algunas pantallas táctiles funcionan con la reflexión interna frustrada.

Experimento 2. Reflexión total interna en un rectángulo de acrílico. Apuntando el láser por uno de los lados observarás la reflexión en el interior del cubo. Al aumentar el ángulo de incidencia se alcanza la condición de reflexión total interna, generando una guía de onda en su interior.



Experimento 3. Varilla de acrílico como guía de onda. Extrapolamos lo aprendido en el experimento 3 para ilustrar cómo un cilindro puede “entubar” la luz. Se usa primero un cilindro recto y luego un cilindro curvado. En ambos casos puedes observar cómo la luz viaja dentro y sale del otro lado.





Ejemplos:

- Fibras ópticas. El internet depende de una red de fibras ópticas debajo del mar. Se usa para transportar información. Tiene muchas ventajas sobre los cables de cobre: principalmente que pueden transportar más información de forma más rápida. Extra: ¡los tiburones muerden las fibras ópticas! También las fibras ópticas se pueden utilizar como sensores.
- Aplicaciones en medicina. Formación de imágenes por fibra óptica. Por una fibra óptica se puede introducir un láser potente para realizar cortes de tejido, incisiones o para hacer algún tratamiento óptico.

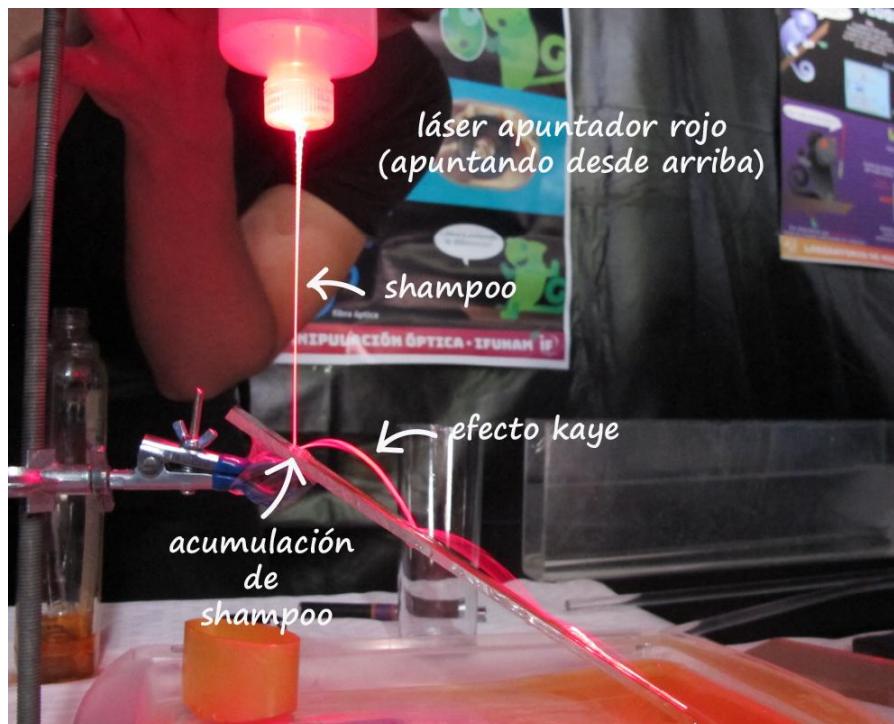
Experimento 4. Cubo de acrílico con agua y miel. Se llena un cubo de acrílico con agua y se agrega una cama de miel en la parte inferior de 2-3 cm de alto. La miel artificial (tipo jarabe de maíz) es buena porque es transparente y tiene un efecto de fluorescencia que permite ver el camino de la luz dentro del cubo usando un láser violeta. La miel necesita un par de horas para asentarse bien y disolverse parcialmente en la frontera con el agua. Apuntando desde abajo observarás la reflexión en la región donde la miel se junta con el agua. En este caso la reflexión total no es abrupta, sino que sigue una trayectoria curva hacia abajo, hacia el medio con mayor índice de refracción.



Ejemplo:

- Los espejismos y la reflexión de ondas de radio en la estratosfera y la ionósfera.
- El color rojo de la luna en los eclipses de luna. La luz se refleja (refracta) en la atmósfera de la tierra al intentar pasar de una capa con índice de refracción mayor en la tropósfera-estratosfera a uno menor en la estratosfera-ionósfera alcanzando a iluminar a la luna.

Experimento 5: Champú cayendo y efecto Kaye. Se puede usar cualquier cambio de medio para “entubar la luz”, sólo basta con que este sea más denso o tenga un mayor índice de refracción que su exterior. En particular un hilo de champú cayendo desde un recipiente elevado. Apuntando el láser desde arriba observarás el hilo brillar y si le soplas seguirá brillando a pesar de curvarse. Buen momento para que los niños se acerquen a soplar y recibir preguntas.

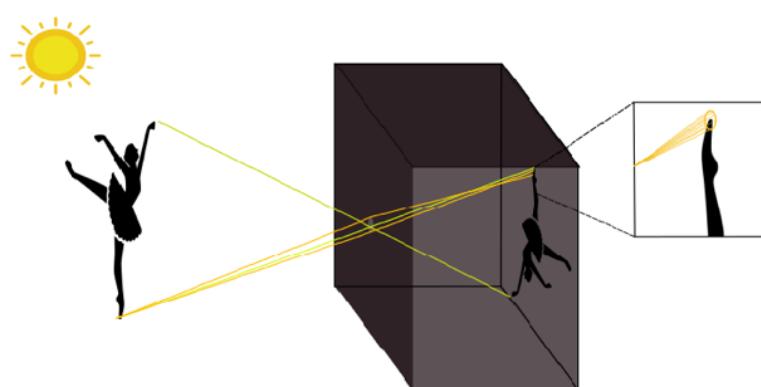


FORMACIÓN DE IMÁGENES

Objetivo: Mostrar algunas propiedades de la luz que nos permiten formar imágenes para distintos fines.

Introducción: El puente más importante entre el mundo que nos rodea y nosotros mismos es el sentido de la visión. Para que la visión sea posible, necesita ir de la mano con algo más: la luz. Este mundo lo percibimos a través de imágenes, en donde los ojos y nuestro sistema cognitivo juegan un papel preponderante. También los instrumentos como las cámaras fotográficas o las webcams son instrumentos que forman imágenes, pero antes de continuar vale la pena hacerse la pregunta ¿qué es y cómo se forma una imagen?

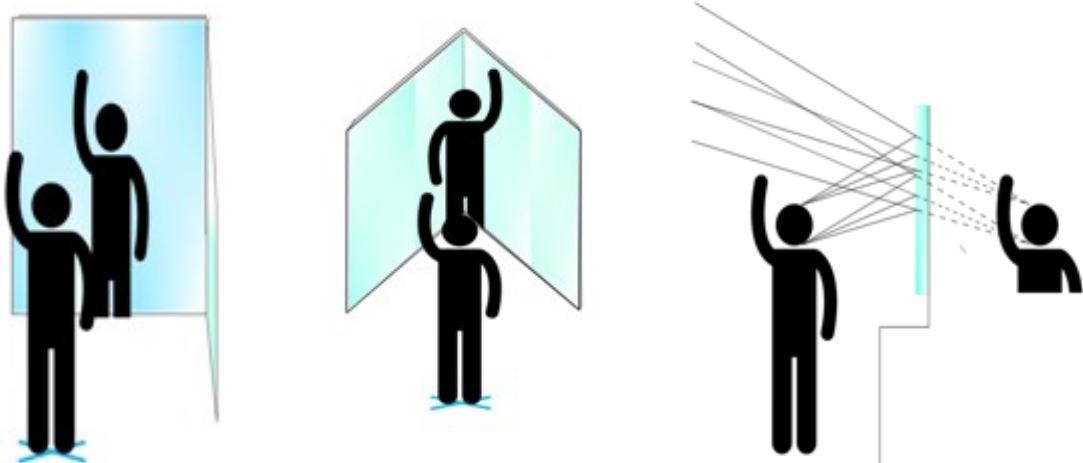
Experimento 1: Cartón con agujeros (funcionamiento de la cámara oscura). Realiza algunos agujeros de distintos tamaños y formas en distintas partes del cartón. Algunos pueden ser muy cercanos entre sí y otros no tanto. Coloca una pegatina sobre una lámpara e ilumina con la lámpara, en un cuarto oscuro, el cartón con los agujeros proyectando sobre una pared la luz que deja pasar. Observa las imágenes proyectadas en función del tamaño del agujero.



¿Por qué pasa eso? imagina un día soleado, una cámara oscura (una caja cerrada con un agujero por donde puede pasar la luz) y una bailarina como en la figura de abajo. Si miras dentro de la caja, podremos observar una imagen real e invertida de la bailarina proyectada en una pared de la caja. Esto sucede porque cada punto de la bailarina refleja una infinidad de rayos en todas direcciones, de los cuales solo una parte de ellos, definidos en un cono, pasan a través del agujero. Esto permite discernir en la pantalla la luz que viene de cada punto, formando de esta forma una imagen. Así podemos decir que una imagen no es otra cosa que la luz proyectada proveniente de un objeto en la cual se pueden discernir los puntos luminosos que componen al objeto. Mientras más pequeño es el agujero en el cartón, menor es la cantidad de luz que pasa a través de él y la imagen proyectada será más nítida. Cuando el agujero es más grande, mayor es la cantidad de rayos que pasan por él, y la imagen será menos nítida.

Nuestros ojos funcionan de forma parecida. Cuando es de día, nuestra pupila no necesita dejar pasar tanta luz para formar una imagen, y tiende a hacerse más pequeña, generando una imagen más nítida. En cambio, cuando es de noche, se expande para poder captar la mayor cantidad de luz y poder formar imágenes. ¿Qué pasa con la imagen invertida? nuestro cerebro se encarga de eso. En el caso de nuestros ojos, además de la abertura controlada por la pupila, también existe un lente que permite ajustar el enfoque.

Experimento 2: Espejos a 90º. Si encuentras dos espejos de tal manera que formen un ángulo de 90º entre ellos, verás tu propio reflejo en distintas posiciones como se ilustra a continuación.



Una de las propiedades más importantes de la luz es la reflexión. En un espejo plano el rayo incidente es igual al rayo reflejado. Es por eso que cuando nos paramos frente a un espejo, lo que vemos es un sólo reflejo. Cuando lo hacemos 10

frente a dos espejos que forman un ángulo de 90° , los rayos incidentes son reflejados dos veces. Por eso, al alzar la mano izquierda, el reflejo que vemos parecería ser el de la mano derecha, pero no es así.

Todos estos reflejos que vemos son imágenes virtuales. No son reales, pues no podemos proyectarlas sobre una superficie, ya que en realidad la imagen se encuentra ubicada detrás del espejo y la podemos ver solamente porque nuestros ojos nos permiten proyectar la imagen real en la retina.

Experimento 3: La rana. Pon un espejo parabólico de base. Ahora coloca un objeto sobre él (en este caso una ranita), y tapa el primer espejo con otro espejo parabólico con un agujero en el centro. Observarás una imagen de la ranita justo a la entrada como si fuera la real. A este instrumento se le conoce como mirascopio.



Esto se debe a que una de las propiedades de los espejos parabólicos es hacer converger la luz que incide en ellos en un solo punto llamado foco. Cuando usamos dos espejos parabólicos y colocamos un objeto en el centro del espejo base, los rayos que refleja el objeto inciden en el espejo que pusiste como tapa. Estos mismos rayos son reflejados al espejo base y, por tratarse de un espejo parabólico, éste hará converger todos estos rayos en un punto (sobre el orificio del espejo tapa), formando una imagen real del objeto que colocamos dentro.

En nuestra vida diaria estamos rodeados de este tipo de espejos curvos. Un ejemplo son los retrovisores de los coches, que incluso tienen una leyenda sobre ellos que dice “los objetos pueden estar más cerca de lo que aparentan”. Por cierto, en este caso se trata de espejos convexos.

Experimento 3. Formación de imágenes con una lente convergente. Las lentes convergentes como las que conforman las lupas son aquellas que logran concentrar todos los rayos de luz que pasan a través de ella en un punto llamado foco. A esta distancia se le llama distancia focal. Pero ¿por qué en algunas ocasiones observamos el objeto de forma invertida? Como lo podemos ver en el ejemplo de arriba, la luz que sale de la pantalla luminosa sale con forma de una flecha que apunta hacia arriba, pero la imagen que se proyecta en la pantalla es una flecha que apunta hacia abajo, y esto sucede por la forma en que se refractan los rayos que pasan a través de la lupa. Si pensamos solo en los rayos que salen de la punta de la flecha, aquellos rayos llegarán a la lente y se van a refractar proyectando la punta en la parte de abajo de la pantalla. Entonces con el otro extremo de la flecha sucederá lo contrario y se proyectarán en la parte de arriba de la pantalla formando al final una flecha invertida. Similar a lo que sucede en una cámara oscura. Incluso podemos observar esta inversión de imágenes no solo en la proyección del objeto sobre una pantalla sino también sobre la misma lupa y esto ocurrirá cuando la distancia del objeto observado en la lupa sea mayor que la distancia focal.

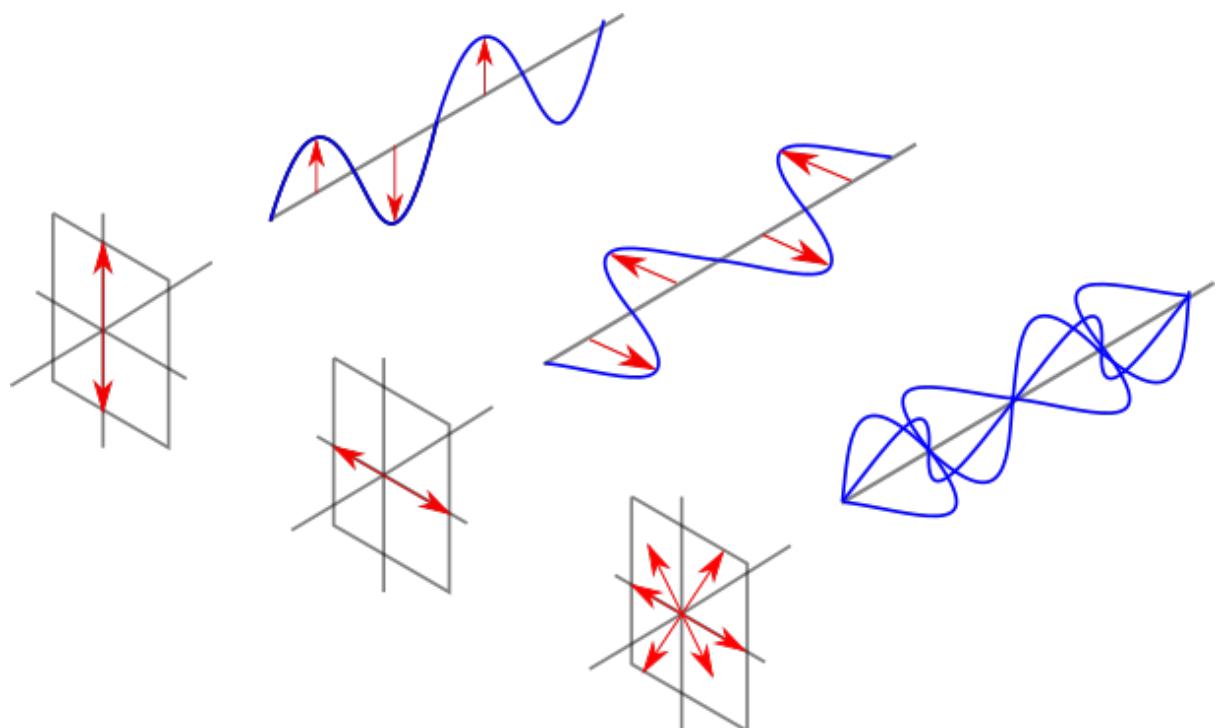


LA LUZ COMO UNA ONDA Y SU POLARIZACIÓN

Objetivo: Comprobar la naturaleza ondulatoria de la luz mediante fenómenos que permitan observar la polarización como lo son la birrefringencia y la polarización lineal por reflexión. También, conocer algunas de las aplicaciones cotidianas de la polarización y otras más específicas como la fotoelasticidad.

Introducción: Todo mundo está de acuerdo con que la luz viaja en forma de rayos. De hecho, a veces decimos “cuidado, te van a quemar los rayos del Sol”, pero no es tan común escuchar que la luz es una onda. Sí, una onda transversal como una ola en el mar o como la ola que hace la gente en un estadio. Por más extraño que esto suene ¡es cierto!

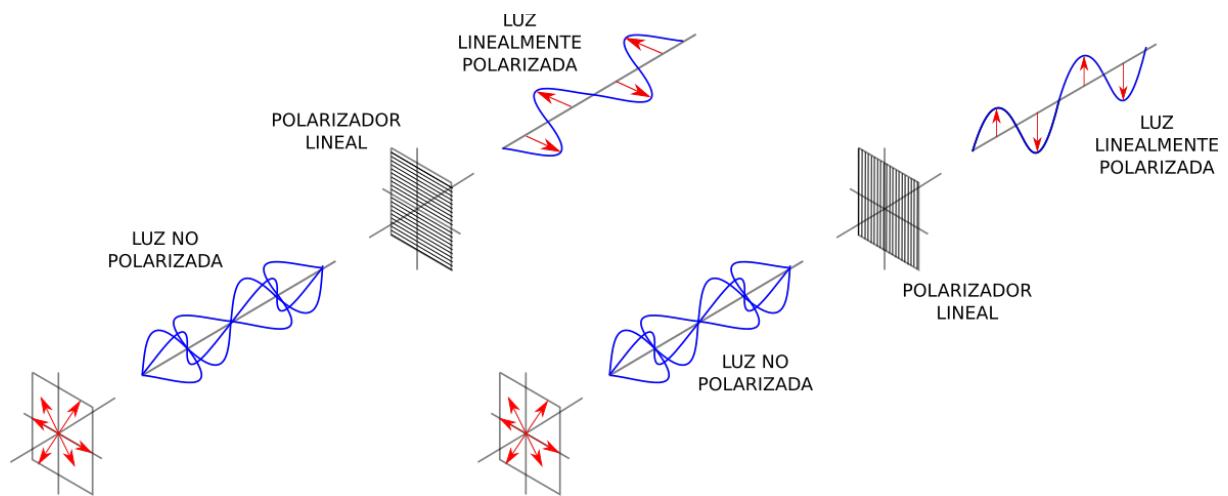
La luz puede entenderse como un conjunto de rayos compuestos por pelotitas muy chiquitas o como ondas que se propagan en donde sea que ésta se encuentre ¡incluso en el vacío!. Estas dos formas de entender la luz se vienen enfrentando desde hace siglos. Primero se creía que era un conjunto de pelotitas rígidas, después empezó a ganar la idea de que era una onda y por último, a principios del siglo pasado, se llegó a la conclusión de que en realidad la luz es tanto onda como partícula. Pero ¿cómo podemos convencernos de que la luz es una onda? Fácil: las ondas transversales cuentan con una propiedad conocida como polarización que se refiere a la dirección en la que vibran estas ondas.



En la naturaleza podemos encontrar luz con distintos tipos de polarización: polarización vertical, horizontal o en forma no polarizada, es decir que oscila en todas direcciones.

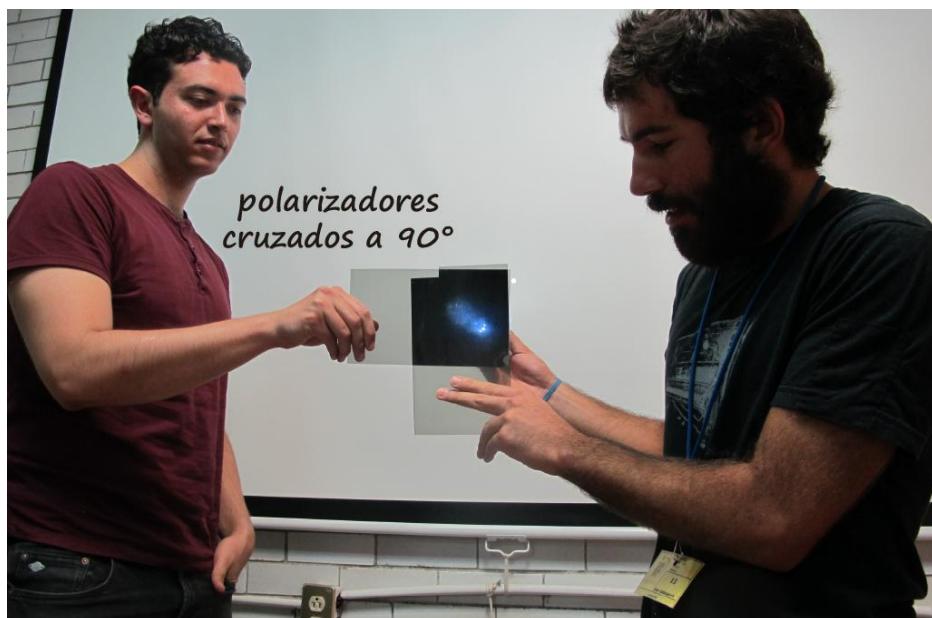
En los experimentos que platicaremos a continuación encontrarás ejemplos en los que se hace evidente la polarización de la luz. Para poder entender mejor estos efectos convendrá tener a la mano un polarizador lineal. Este instrumento nos permite filtrar solamente una de las orientaciones de la vibración de la luz.

Experimento 1: Polarizadores. Podemos entender un polarizador lineal como una rejilla microscópica que sólo permiten pasar ondas que vibran en una dirección.



Cuando se hace pasar luz no polarizada a través de un polarizador, del otro lado tendremos luz que sólo vibra en una dirección, por ejemplo, horizontalmente. Si ahora rotamos el polarizador noventa grados respecto al anterior, la luz que sale vibra verticalmente.

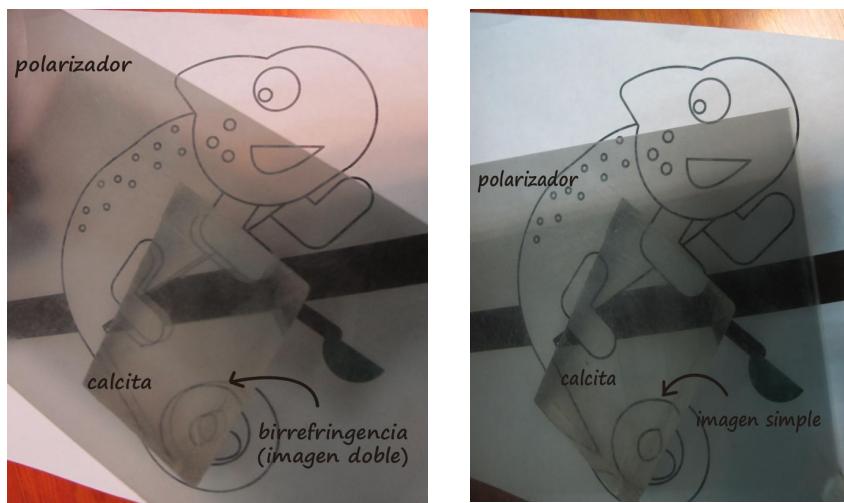
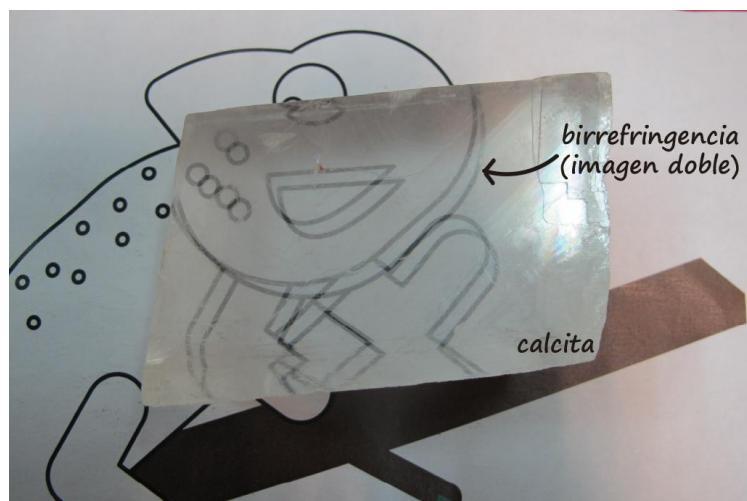
Si colocamos un polarizador después de otro y éstos no se encuentran alineados en la misma dirección, la intensidad de la luz disminuye. Si ahora rotamos alguno de ellos hasta que se encuentren cruzados la intensidad disminuye al mínimo.



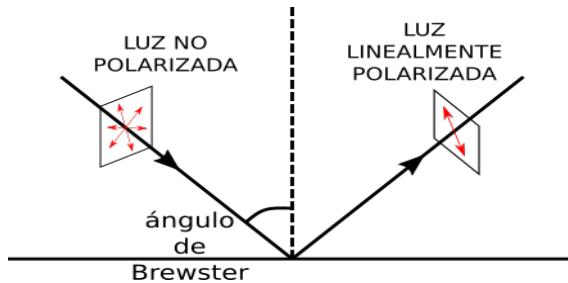
Experimento 2: Birrefringencia. Coloca un dibujo que sea de tu agrado sobre una superficie plana. Ahora coloca sobre el dibujo un pedazo de *calcita* o *espato de Islandia* (si no lo tienes a la mano, pregúntale a algún vikingo, al parecer ellos la usaban para orientarse en sus navegaciones antes de que existiera la brújula). Observa el dibujo a través de la calcita. ¡Notarás dos imágenes distintas! Una de ellas se debe a la luz linealmente polarizada y la otra también se forma con luz linealmente polarizada, pero esta polarización se encuentra *cruzada* respecto a la primera. Es decir, la luz no polarizada que viene del Sol (o de la lámpara que uses para iluminar la superficie) y que vibra en todas las direcciones se va a separar en dos tipos de polarización que están *cruzadas* entre ellas (formando un ángulo de 15

noventa grados) y cada una de ellas viaja con una velocidad distinta dentro de la calcita, produciendo dos imágenes en tu ojo. Esto se conoce como birrefringencia y es una propiedad óptica que presentan algunos cristales.

Si ahora interpones un polarizador lineal entre la calcita y tus ojos y empiezas a rotarlo, notarás que una de las imágenes va disminuyendo en intensidad mientras que la intensidad de la otra aumenta. Si sigues rotando el polarizador encontrarás un ángulo en donde sólo verás una imagen. Estás cancelando una de las imágenes con el polarizador porque lo tienes *cruzado* respecto a la polarización de la luz que genera esa imagen.



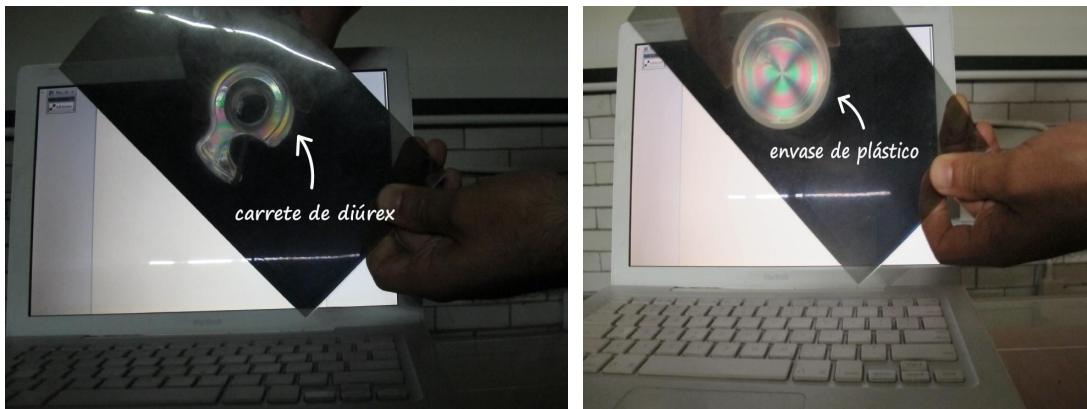
Experimento 3: Ángulo de Brewster. Consigue una lámpara de luz blanca, una superficie plástica que refleje bien la luz y un polarizador lineal. Pídele a alguien más que ilumine la superficie desde un lado con la luz de la lámpara a un ángulo arbitrario y tú párte al otro lado buscando ver la luz reflejada por la superficie. Recuerda la ley de reflexión: el ángulo con el que incide la luz será el mismo con el que se refleja. Una vez que veas la reflexión, interpón el polarizador y empieza a girarlo, verás que la intensidad de la luz reflejada disminuye. Con el polarizador en la posición en donde la intensidad de la luz sea mínima, pídele a tu ayudante que empiece a cambiar gradualmente el ángulo con el que hace incidir la luz sobre la superficie (también tú te tendrás que ir ajustando al nuevo ángulo de reflexión). Con un poco de suerte y astucia encontrarás un ángulo donde la intensidad de la luz que proviene de la reflexión prácticamente se anula, este ángulo se conoce como el ángulo de Brewster. Cuando la luz no polarizada incide sobre una superficie plana con el ángulo de Brewster, la reflexión se encontrará linealmente polarizada como se muestra en el siguiente esquema.



Experimento 4: Fotoelasticidad. Consigue una computadora y abre un editor de texto u otra aplicación para que el brillo de la pantalla sea mayoritariamente blanco. Pídele a alguien que sostenga un polarizador a cierta distancia de la pantalla y que vaya rotando gradualmente el polarizador hasta que la intensidad de la luz que proviene de la pantalla se anule (¡Así es! La luz de las pantallas de las computadoras o los celulares se encuentra, a veces, linealmente polarizada).

Hazte de algún plástico transparente como la envoltura de algún dulce o el molde de una gelatina y colócalo entre la pantalla y el polarizador. Verás una gama impresionante de colores exóticos en la superficie del plástico. Estos colores se deben a la orientación que mantienen las moléculas que componen al plástico, que en muchos casos se reorientan por las fuerzas internas (esfuerzos) que mantienen la forma del plástico y que se formaron cuando el plástico pasó de una forma líquida a su forma sólida final en su proceso de fabricación. Los esfuerzos cambian la polarización de la luz incidente en cada punto del plástico, y esta va a depender de la longitud de onda, así que con esto logramos ver la luz que proviene de la pantalla descompuesta en colores.

Este experimento se puede formalizar y constituye una técnica llamada fotoelasticidad que sirve para estudiar los esfuerzos de ciertos materiales a partir de la polarización de la luz. Debido a los esfuerzos internos de los plásticos la polarización de la luz cambia en cada punto y aunque el polarizador esté *cruzado* respecto a la pantalla, observamos la luz que proviene de ésta con una gama de colores impresionante.



INTERFERENCIA, DIFRACCIÓN Y EL PUNTO DE ARAGO

Objetivo: Mostrar los fenómenos de la interferencia y difracción de la luz. Mostrar qué sucede cuando la luz coherente, como la proveniente de un láser o de una fuente puntual, pasan a través de obstáculos. Hacer una demostración del experimento de Arago.

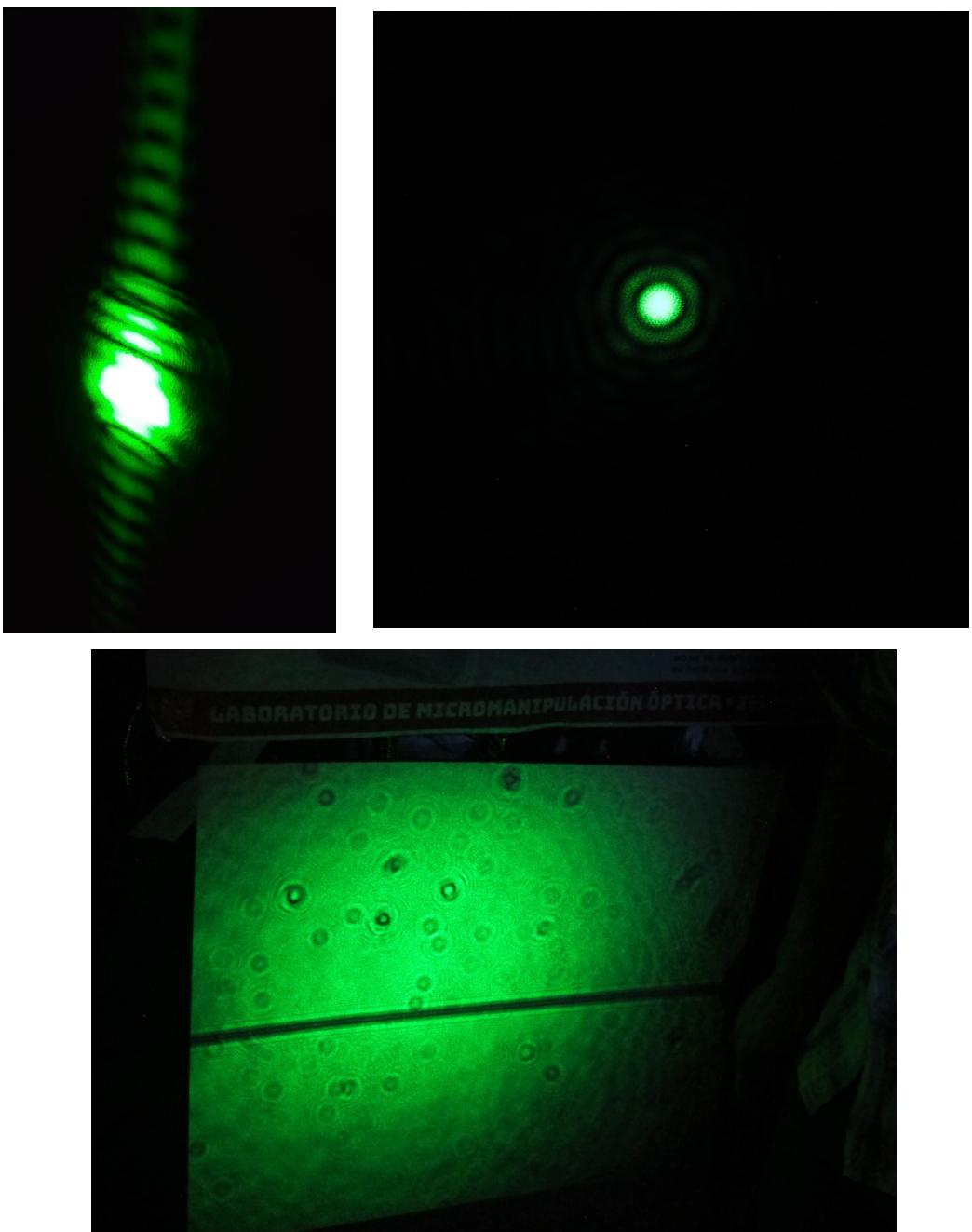
Introducción: De acuerdo con la óptica de rayos si un objeto opaco se interpone entre una fuente de luz puntual y una pantalla, la sombra del objeto estaría

delimitada por una línea divisoria perfectamente nítida. Este experimento no es fácil de realizar ya que las fuentes puntuales no son fáciles de conseguir, así que resolver a esta simple cuestión no resulta trivial. Un láser es una fuente de luz alternativa que también puede funcionar. Como veremos en las demostraciones a continuación, los bordes de las sombras presentarán un fenómeno de difracción que se manifiesta como un patrón de franjas brillantes y oscuras.

HISTORIA INTERESANTE: Vale la pena mencionar un poco acerca de la historia de la difracción:

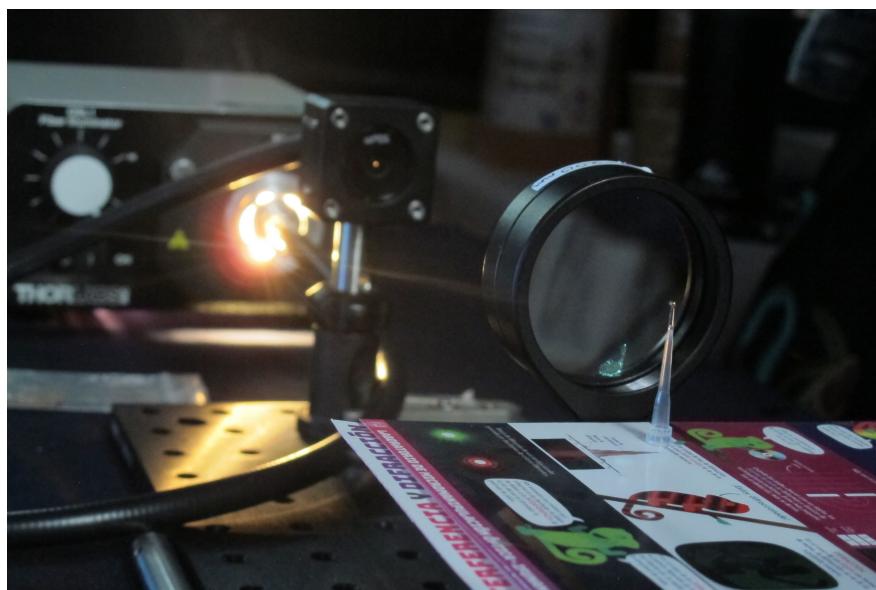
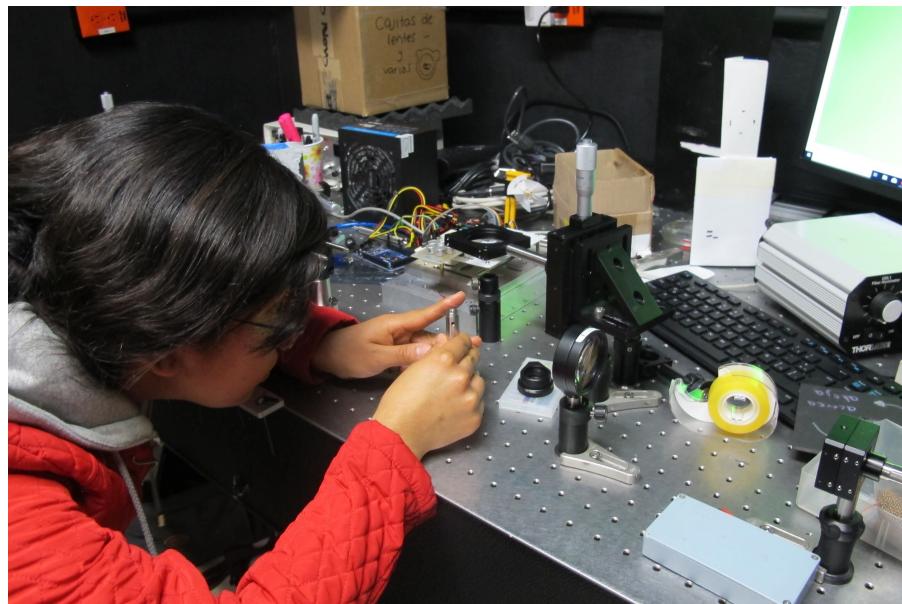
- 1665 Grimaldi estudia la sombra generada por una abertura.
- 1678 Huygens propone por primera vez una teoría ondulatoria de la luz. Enuncia que “Cada punto de un frente de onda se considera como una nueva fuente de ondas secundarias cuya superposición da un nuevo frente de onda”.
- 1804 Thomas Young incorpora el concepto de interferencia, es decir que la luz puede superponerse generando zonas oscuras y brillantes.
- 1818 Fresnel hace la predicción matemática del patrón de difracción (Teoría de difracción de Fresnel). La academia Francesa de Ciencias organiza una competencia para la mejor explicación de la difracción. Fresnel participa con su teoría, proponiendo que la luz podría ser una onda, pero el matemático Poisson, que gozaba de mucho prestigio en la época, y que era partidario de la teoría corpuscular de la luz, intenta ridiculizar los postulados de Fresnel. Utilizando los principios propuestos por Fresnel, Poisson realiza una serie de cálculos que predicen que con estos principios sería posible observar un punto brillante en la sombra de un obstáculo circular, argumento que desestima de manera tajante y lo utiliza para ridiculizar el trabajo de Fresnel. Arago se encargó de realizar y comprobar esta predicción.

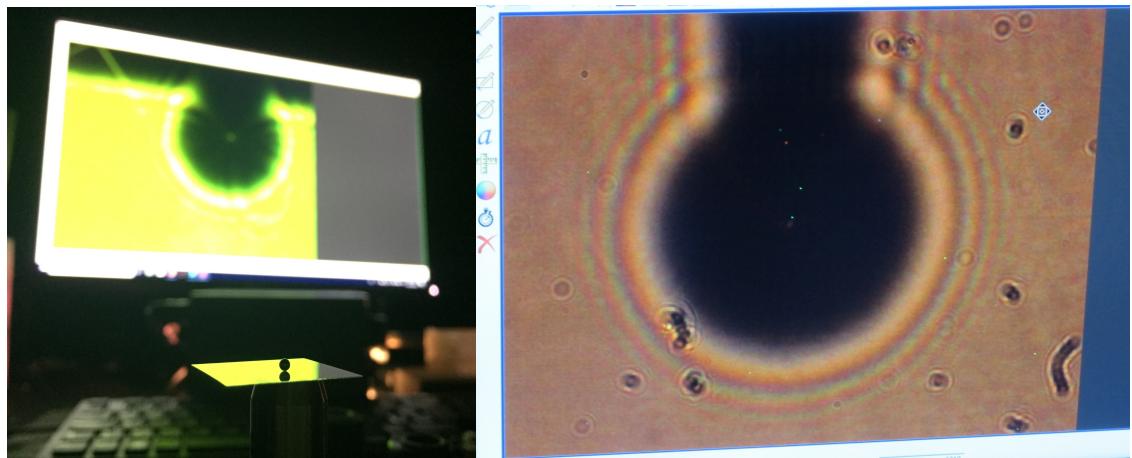
Experimento 1. Difracción con objetos de la vida cotidiana (cabello, navaja para rasurar). El uso del láser se tiene que hacer con la supervisión de un adulto. Se recomienda no exponer la vista mucho tiempo a la luz de este. En una habitación oscura toma un láser de bolsillo e incide directamente sobre el objeto, verás que en la pared o en una pantalla se forma un patrón de difracción, caracterizados por zonas brillantes y oscuras.



Experimento 2. Difracción con un objeto esférico. Observar directamente la difracción de la luz con un láser es relativamente sencillo, pero para convencernos que es un fenómeno que sucede con cualquier fuente luminosa veamos el experimento de Arago. En este caso utilizaremos una fuente de luz común, pero muy brillante. Se coloca sobre una base un balón muy pequeño del orden 1mm y se ilumina con luz coherente, que puede ser con un láser, pero esto resulta un poco aburrido. En su lugar lo iluminamos con luz común que pasa por un agujero muy muy pequeño, menor a 100 micrómetros. Este se puede fabricar con una aguja sobre papel aluminio, en nuestro caso utilizamos un pinhole de 30 micrómetros.

Esto genera algo parecido a una fuente de luz puntual, como la de las estrellas. También es importante colimar con un lente la luz que logra pasar el agujero. Como la luz que ilumina al balón o a nuestro objeto circular va a ser muy tenue, es muy difícil observar el fenómeno a simple vista. Para esto utilizamos una cámara que resulta más sensible que nuestros propios ojos. Al observar la sombra del balón nos podemos percatar de algo completamente inesperado, la aparición de un punto brillante muy pequeño en el centro.





LA LUZ Y EL COLOR

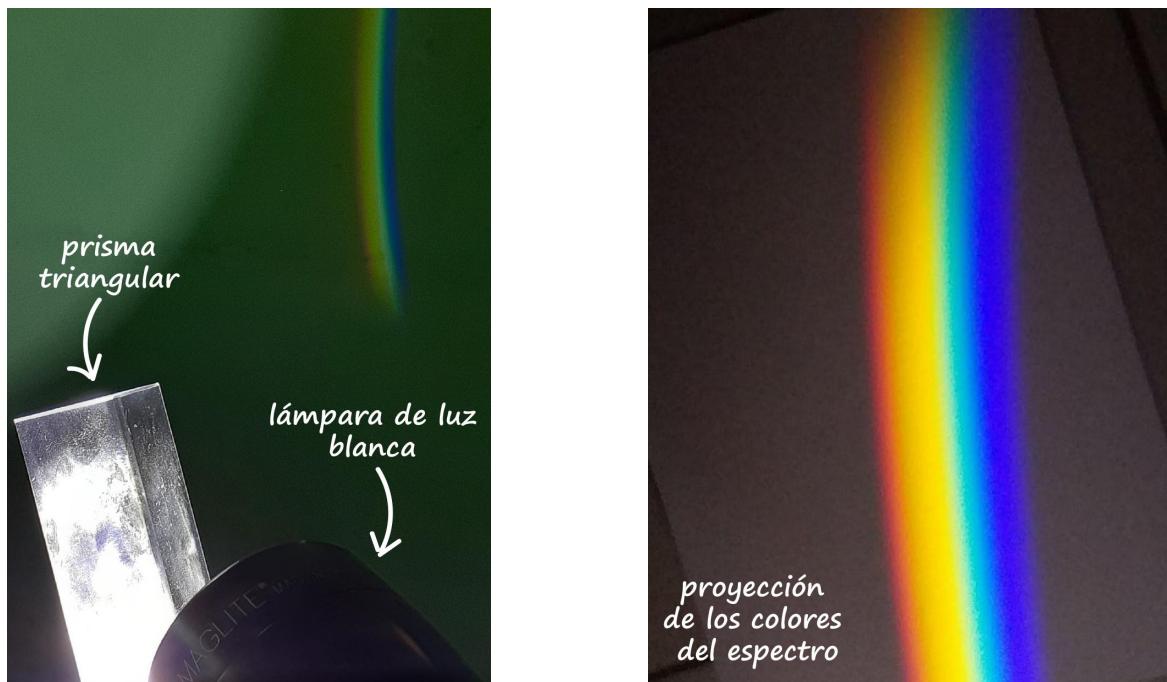
Objetivo: Mostrar que la luz que se percibe como blanca está formada por luz de todos los colores (frecuencias visibles). Mostrar que los colores rojo, verde y azul son los colores primarios de la luz y se combinan de manera aditiva. Mostrar que los colores cian, magenta y amarillo son los colores primarios en los pigmentos y se combinan de manera sustractiva.

Introducción: La luz que brilla en nuestro alrededor es una parte pequeña de la radiación electromagnética que podemos percibir con nuestra vista. Cuando la luz entra al ojo, llega a la retina donde hay células sensibles a la luz: los conos y los bastones. De éstos, sólo los conos perciben color. Los colores que percibimos dependen de la frecuencia o longitud de onda de la luz. Así la luz que percibimos como luz blanca no es otra cosa sino la mezcla de la radiación con todas las frecuencias visibles, aunque, como veremos más adelante, no es necesario que la luz contenga todas las frecuencias para que la podamos percibir como blanca. Cuando esta radiación incide sobre la materia, algunas frecuencias son absorbidas o esparcidas más que otras y otras son reflejadas o transmitidas dependiendo de su composición y estructura química, resultando en la tonalidad particular de todos los objetos que nos rodean.

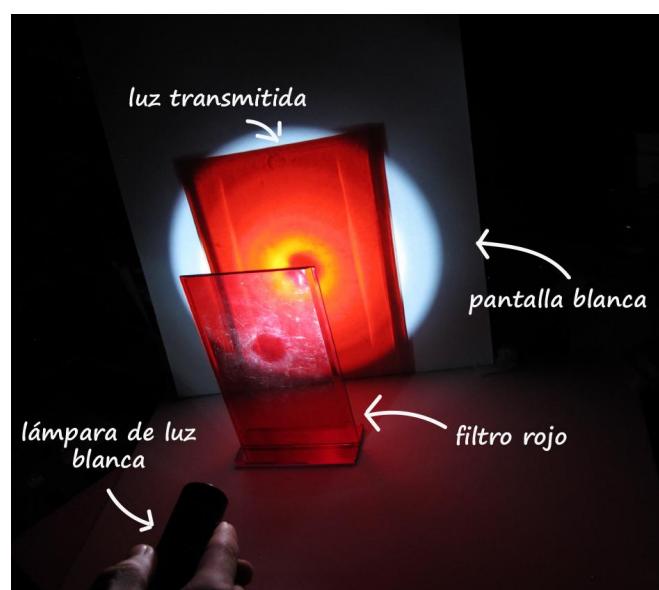
Luz Blanca

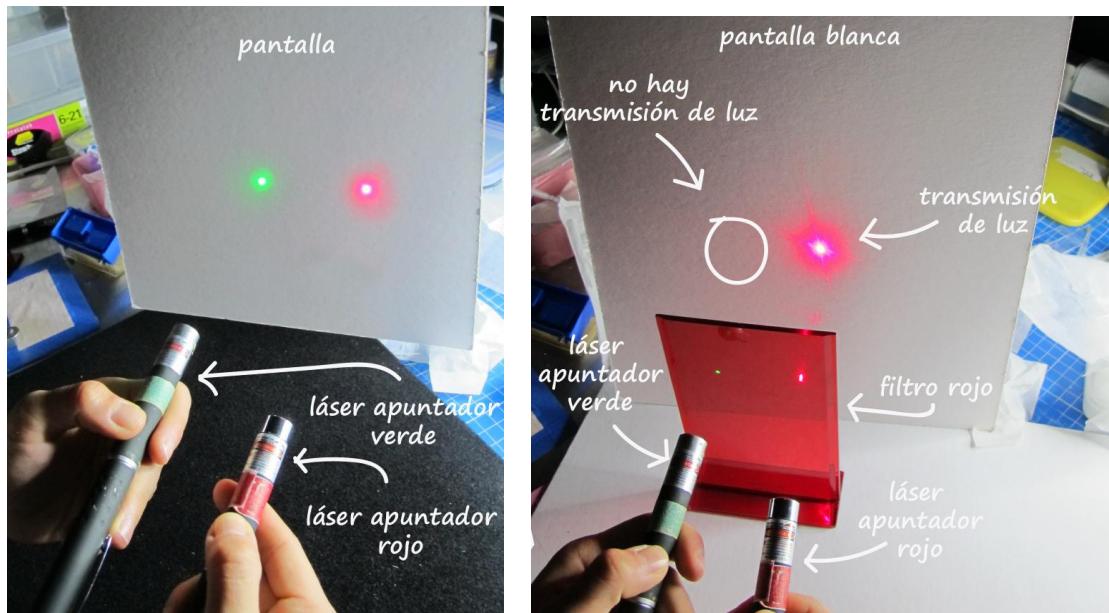
Experimento 1: Dispersión de la luz blanca con un prisma triangular. Cuando la luz pasa por un medio transparente, su rapidez promedio es menor a la velocidad de la luz en el vacío c . La disminución depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia de la luz. La luz con mayor frecuencia se propaga con más lentitud que la de frecuencia menor. Como las distintas frecuencias de la luz se propagan a rapideces diferentes en materiales transparentes, se refractan de forma distinta. Cuando la luz blanca se refracta al atravesar un prisma, se nota la separación de los colores que la forman.

Para obtener el espectro de colores, haz incidir la luz blanca intensa de forma rasante en una de las caras del prisma triangular, el espectro se proyectará en dirección de la cara opuesta de donde incide la luz. Típicamente se habla de siete colores, los colores del arcoíris, aunque en realidad el restringir a solo siete colores el espectro de la luz tiene que ver más con un pensamiento místico. Para que puedas ver los colores bien definidos, la proyección debe ser por lo menos a un metro de distancia.

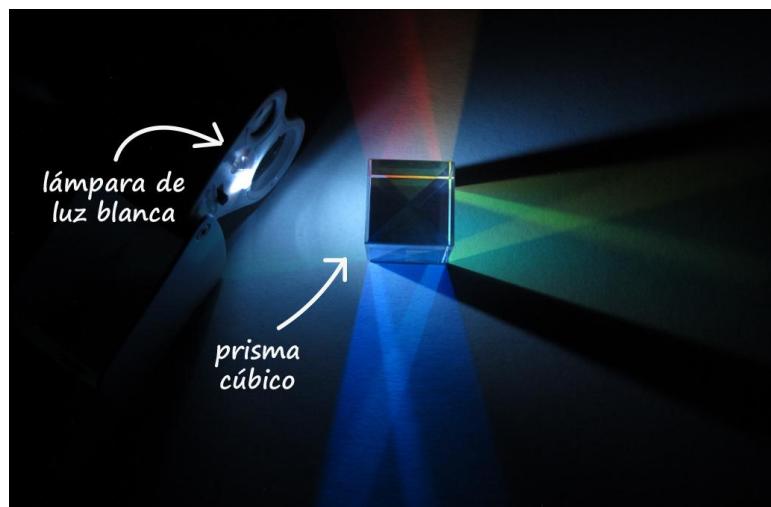


Experimento 2: Transmisión selectiva de la luz blanca. El color de un objeto transparente depende del color de la luz que transmite. Un trozo de vidrio rojo parece rojo porque absorbe todos los colores que forman la luz blanca, excepto el rojo, que es el que transmite. Usa un filtro rojo, puede ser un acrílico rojo o algún plástico rojo (existen algunos materiales que son mejores que otros) y verás que, al hacerle pasar luz blanca, la luz que se transmite se percibirá roja. Si le haces pasar luz verde, por ejemplo, de un láser verde, se observará que no se transmite la luz, y si le haces pasar luz de un láser rojo, se observará que pasa toda la luz.





Experimento 3: Dispersión de la luz blanca con un prisma cúbico. Este prisma muestra lo descrito en los experimentos anteriores ya que cuenta con unos filtros que permiten dividir la luz en un espectro discreto (un color en cada cara del prisma). Para mostrar el efecto de este cubo usa una lámpara de baja intensidad ya que refleja la luz en distintas direcciones.



Mezcla de Luces de Colores

Experimento 4: Adición de luces de colores. Para este experimento necesitarás tres lámparas: una roja, una azul y una verde (pueden ser las lamparas Maglite cada una con un filtro, o las lámparas de led del kit de la OSA). Superpón la luz de estas tres lámparas proyectándose en una pantalla. Tendrás como resultado:

$$\text{Azul} + \text{Verde} = \text{Cian}$$

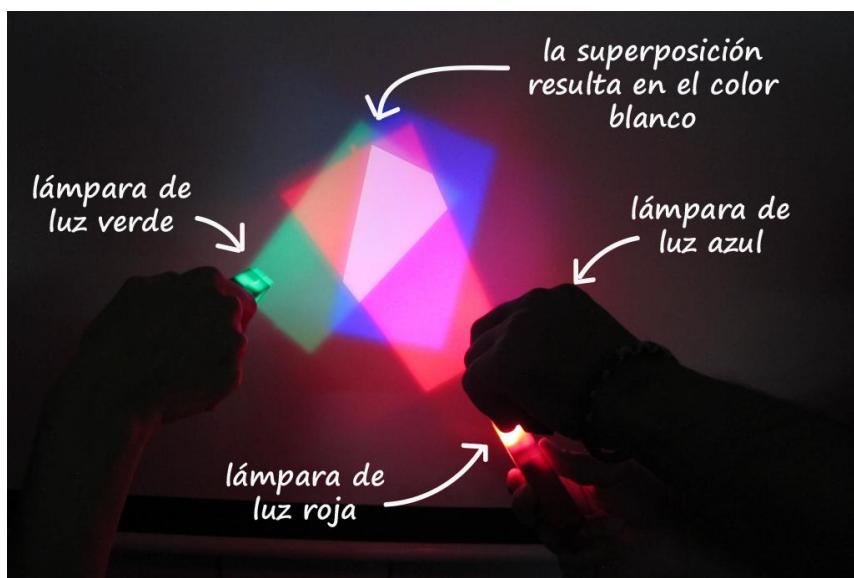
$$\text{Verde} + \text{Rojo} = \text{Amarillo}$$

$$\text{Rojo} + \text{Azul} = \text{Magenta}$$

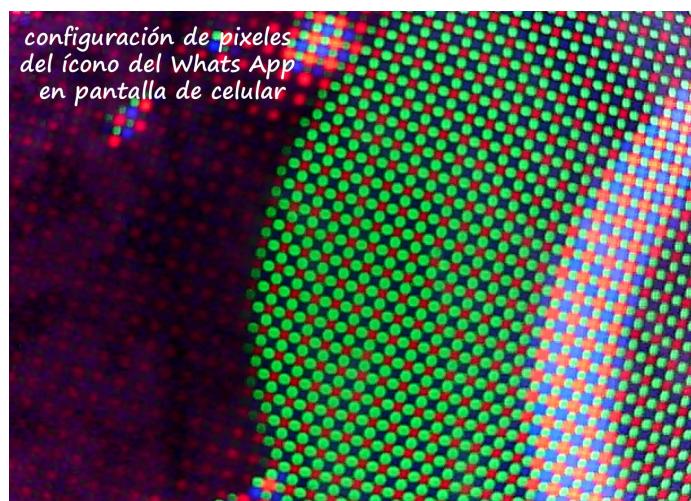
$$\text{Rojo} + \text{Azul} + \text{Verde} = \text{"Blanco"}$$



Puede ser que el color central al superponer la luz de las tres lámparas no se vea exactamente blanco. Esto podría deberse a que una de las tres lámparas supera a las demás en intensidad (brillo). De hecho, se puede mostrar que el color resultante puede variar según la intensidad de cada lámpara. Se dice que la luz se mezcla de forma aditiva porque se suma para formar el color blanco.



Experimento 5: RGB y las pantallas de los dispositivos electrónicos. Utiliza el microscopio Dino-Lite y una computadora con el software DinoCapture 2.0 instalado. También es posible utilizar una lupa de magnificación alta o incluso una gota de agua sobre la pantalla. Con esto, puedes observar los píxeles de diferentes pantallas, como la de la misma computadora o la de teléfonos celulares para mostrar las diferentes configuraciones de píxeles RGB. RGB son las siglas en inglés de rojo, verde y azul. Conforme el microscopio se desenfoca de la pantalla observa cómo se mezclan los colores para generar el color que percibimos a simple vista y cómo las luces RGB se combinan para formar cualquier tono. En el caso del blanco, las tres fuentes RGB tienen la misma intensidad. Se dice que éstos son los tres colores primarios de la luz.



Mezcla de pigmentos

Experimento 6: Reflexión selectiva. Para mostrar que el color de los objetos depende de la luz que los ilumina, coloca diversos objetos o pigmentos que tengan colores como rojo, azul y verde. Verás que al iluminarlos con luz blanca estos colores serán nítidos y brillantes. Ahora iluminalos con luz roja, notarás que los objetos rojos se ven rojos porque absorben toda la luz de otras frecuencias (colores) que no son el rojo, y el resto de los colores (rojo y azul) se verán opacos, incluso casi negros, según la cantidad de luz blanca que esté llegando de otras fuentes. Si repites lo mismo pero ahora con luz verde, observarás que los objetos rojos o azules se ven negros y que los objetos verdes se ven más brillantes.



Experimento 7: Sustracción de pigmentos de colores. La sustracción de colores puede mostrarse ya sea mezclando pinturas de colores magenta, cian y amarillo, superponiendo tres transparencias o mezclando cualquier otro tipo de pigmentos como plastilina, crayones, colores o acuarelas de estos mismos colores. Esto te dará como resultado:

$$\text{Amarillo} + \text{Magenta} = \text{Rojo}$$

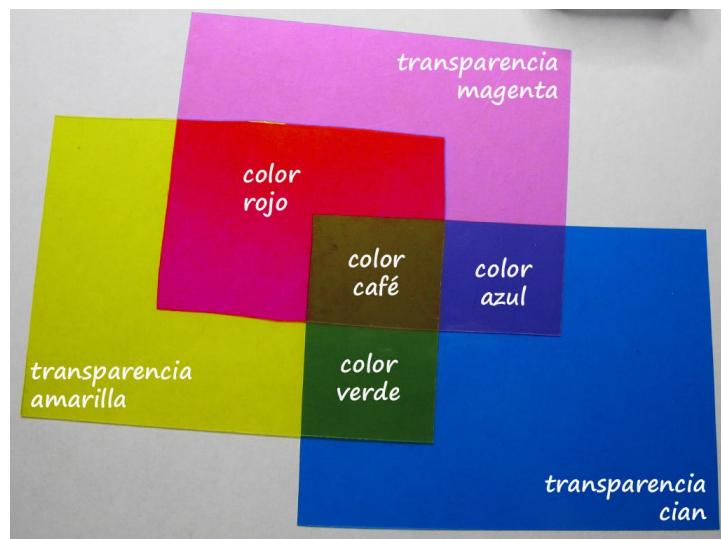
$$\text{Magenta} + \text{Cian} = \text{Azul}$$

$$\text{Cian} + \text{Amarillo} = \text{Verde}$$

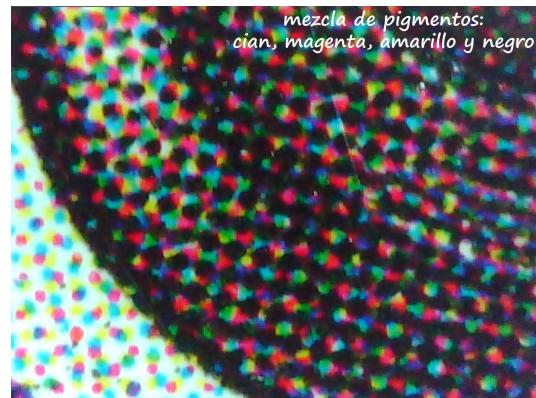
$$\text{Amarillo} + \text{Magenta} + \text{Cian} = \text{Café Obscuro}$$

Te sorprenderá saber que al mezclar estos tres pigmentos no se ve negro, sino café, porque los pigmentos no son del todo complementarios. Por cierto, los colores

complementarios son aquellos que se combinan para generar un color en la escala de grises. En la luz, los colores complementarios se mezclan dando como resultado blanco. En los pigmentos, los colores complementarios se mezclan para formar gris. Por otro lado, y análogo a la mezcla de luces de colores, al mezclar pigmentos cian, magenta y amarillo, el color resultante varía de acuerdo a la cantidad de cada pigmento en la mezcla. Se dice que los pigmentos se mezclan de forma sustractiva ya que se combinan para generar un color oscuro (nada de luz).



Experimento 8: CMY e las impresiones de colores. Utiliza el microscopio Dino-Lite y una computadora con el software DinoCapture 2.0 instalado. Enfoca en diferentes secciones de una impresión, puede ser un cartel o una postal. Observa ahora que los colores que a simple vista parecen homogéneos, realmente están compuestos de pequeñas cantidades de pigmentos cian, magenta, amarillo y negro. De hecho, como los pigmentos CMY se combinan para formar cualquier tono, se dice que éstos son los tres colores primarios de los pigmentos.

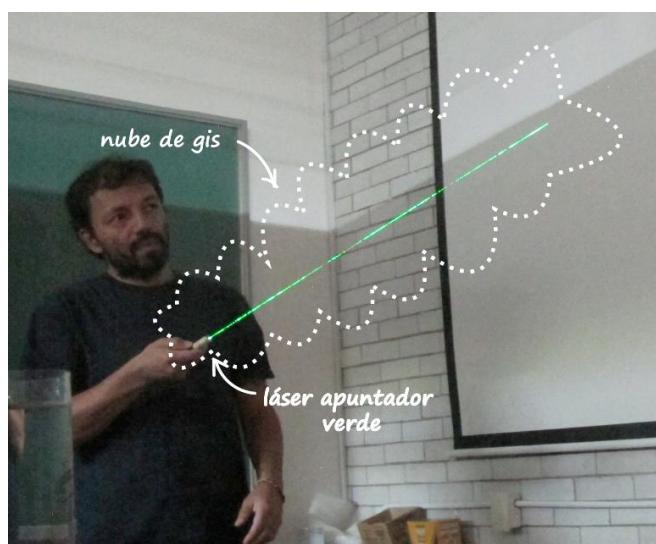


EL COLOR DEL CIELO

Objetivo: Mostrar la descomposición en colores por esparcimiento. Ilustrar el fenómeno del esparcimiento de partículas grandes y pequeñas. Mostrar cómo la luz se esparce más entre más pequeña sea la longitud de onda, en el orden violeta, azul, verde, naranja, rojo. Con esto, explicar las diferentes tonalidades del cielo y el sol a lo largo del día. Mencionar el efecto en la polarización de la luz por el esparcimiento.

Introducción: La luz viaja en línea recta independientemente de su color (longitud de onda), excepto cuando algún objeto obstaculiza su camino. Cuando este objeto es muy muy muy pequeño, la luz se desvía drásticamente de su dirección original por el fenómeno conocido como esparcimiento. Observando la luz que pasa a través de un agujero en un cuarto oscuro podemos percatarnos de las pequeñas partículas de polvo flotando en el aire por el efecto del esparcimiento. Si las partículas son más grandes que un micrómetro, como las partículas de polvo, la luz esparcida se verá blanca. Si el cuarto oscuro está lleno de humo, por ejemplo, con el humo de un fogón en una cocina de leña, la luz esparcida puede verse azul. Similarmente a lo que sucede en un arcoíris, la luz se esparce más siguiendo el siguiente orden: violeta, azul, verde, naranja, rojo. Este es un fenómeno que observamos todos los días en el cielo.

Experimento 1. Esparcimiento de la luz en un cuarto oscuro. Observa la luz que atraviesa un cuarto oscuro. Espolvorea un poco de gis o si es posible libera un poco de humo. Con el gis podrás observar el esparcimiento de partículas grandes, mientras que con el humo podrás observar el esparcimiento de partículas pequeñas. Intentalo con láseres de diferentes colores y con la luz blanca de una lámpara común.

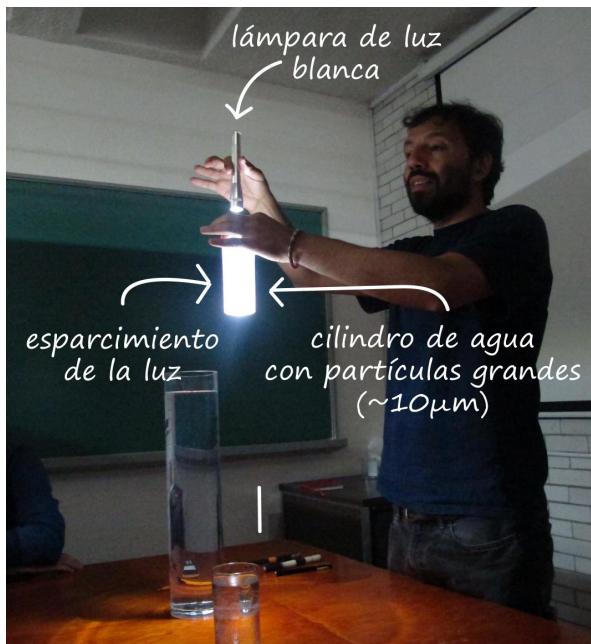


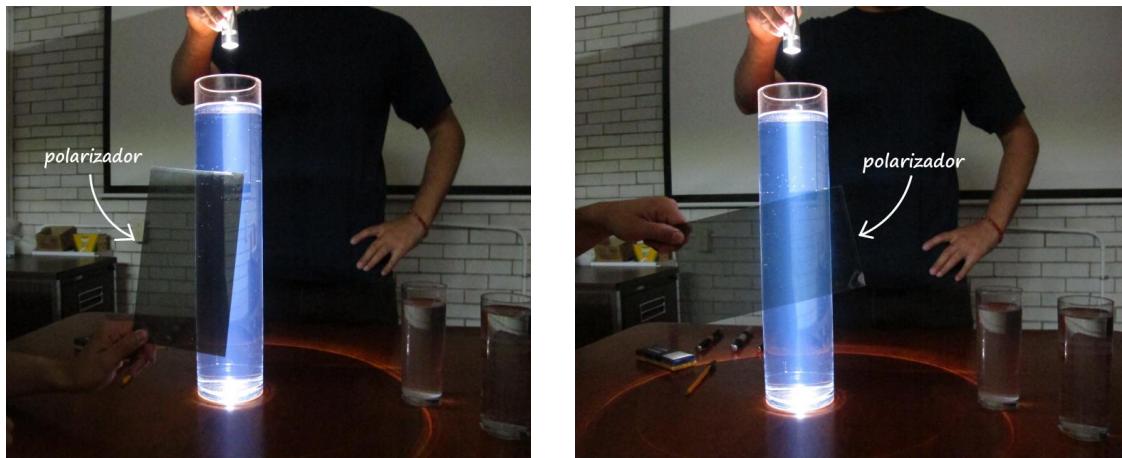
Experimento 2. Esparcimiento en un vaso de agua. Llena dos recipientes transparentes grandes con agua. A uno agrégale un par de gotas de leche o un poco de jabón en barra y revuélvelo bien. Apuntando un láser desde arriba observa las diferencias de la luz esparcida en los dos vasos. Prueba con un láser rojo, uno verde y uno violeta. También puedes intentarlo con una lámpara convencional y tres filtros: rojo, verde y azul. Al final observa el esparcimiento de la luz blanca de una lámpara convencional. Inténtalo desde distintos flancos. Al colocar un polarizador viendo perpendicularmente a la dirección en que viaja la luz observarás que la luz está polarizada.

Ejemplos:

- Los colores del cielo y el sol se pueden entender por este fenómeno. En un día despejado el cielo es azul y el sol naranja. Al atardecer la luz del sol tiene que atravesar mayor atmósfera, generando un color más rojizo. En un lugar sin montañas donde el horizonte es muy extendido es posible observar el color violeta.
- El color rojo de la luna de los eclipses de luna. En realidad en este fenómeno también influye la reflexión (refracción) de la luz por la atmósfera.
- Piensa en el por qué de las luces rojas de las antenas de los edificios, en la luz roja de las luces traseras de los coches y en la luz roja de los semáforos.







FLUORESCENCIA Y FOSFORESCENCIA

Objetivo: Mostrar los fenómenos de fluorescencia y fosforescencia. Ilustrar los efectos que tienen los distintos tipos de luz sobre los materiales y sustancias que presentan este fenómeno. Explicar estos efectos atómicos en términos de emisión y absorción, así como mostrar las similitudes y diferencias entre ambos. Presentar distintos objetos fluorescentes y fosforescentes para dar una idea del tipo de aplicaciones y recalcar que esta emisión de luz tiene sus consecuencias en la estructura atómica de los materiales.

Introducción: El fenómeno de fluorescencia ocurre cuando un material emite luz visible al absorber luz de una longitud de onda menor (o de mayor energía), el caso más común es, por ejemplo, usar luz ultravioleta. Esto se debe a un efecto cuántico de absorción y emisión de fotones causado por los electrones de los átomos y las moléculas que tienen su origen en los orbitales atómicos y moleculares. Cuando el objeto absorbe luz y la vuelve a emitir, la diferencia entre la energía absorbida (del fotón de mayor energía) y la emitida (del fotón de menor energía que regularmente se encuentra en el espectro visible) se disipa en forma de calor. Se dice que la sustancia posee fosforescencia cuando este proceso es muy lento, hablamos desde microsegundos hasta horas. Estos fenómenos son comunes en objetos decorativos e iluminación nocturna pero también tienen distintas aplicaciones y usos fuera de lo decorativo. A continuación, se proponen una serie de experimentos que ayudan a explicar estos dos fenómenos.

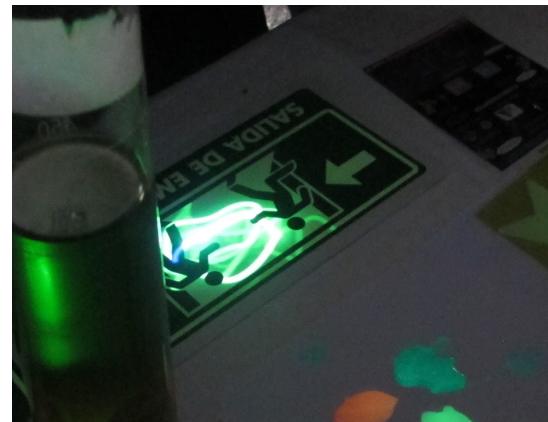
Experimento 1. Objetos que pueden brillar en la oscuridad. Toma algún objeto fosforescente, hay distintos juguetes, cintas, pegamentos o playeras que se pueden conseguir fácilmente en papelerías y tiendas. Observa que cuando oscureces el lugar estos empiezan a brillar. Ahora expón estos objetos directamente a una lámpara de luz blanca, te darás cuenta de que los objetos brillan con más intensidad y durante mayor tiempo. Esto es debido a que estos objetos están fabricados para absorber luz blanca y emitirla durante algunos minutos. Este es el efecto atómico de absorción de luz y emisión de luz característico de los materiales fosforescentes.



Experimento 2. Probando distintos tipos de luz. Ahora observa qué pasa cuando apuntas con láseres de distintos colores a estos objetos, puedes usar láseres rojo, verde y violeta. Notarás que con el láser rojo los objetos apenas brillan, con el verde este brillo aumenta y con el violeta el objeto brilla mucho más. Esto se debe a que cuando los materiales fosforescentes absorben luz con cierta energía emiten luz de menos energía. La luz roja tiene menos energía que la verde y esta a su vez menos que la violeta. Ahora prueba con una lámpara de luz ultravioleta y nota que los objetos brillan aún más que con la luz blanca.

Ejemplos:

- Puedes usar pegamentos fosforescentes y hacer figuras que te agraden para que brillen en la oscuridad.
- En muchos centros nocturnos aprovechan estos objetos para ser más vistosos.
- Consigue una señal de precaución o de emergencia y observa que estos son fosforescentes, algo que puede ser muy útil en la vida diaria.
- El fósforo en un material fosforecente. De hecho, fósforo significa “portador de luz”, de ahí el nombre de este efecto.

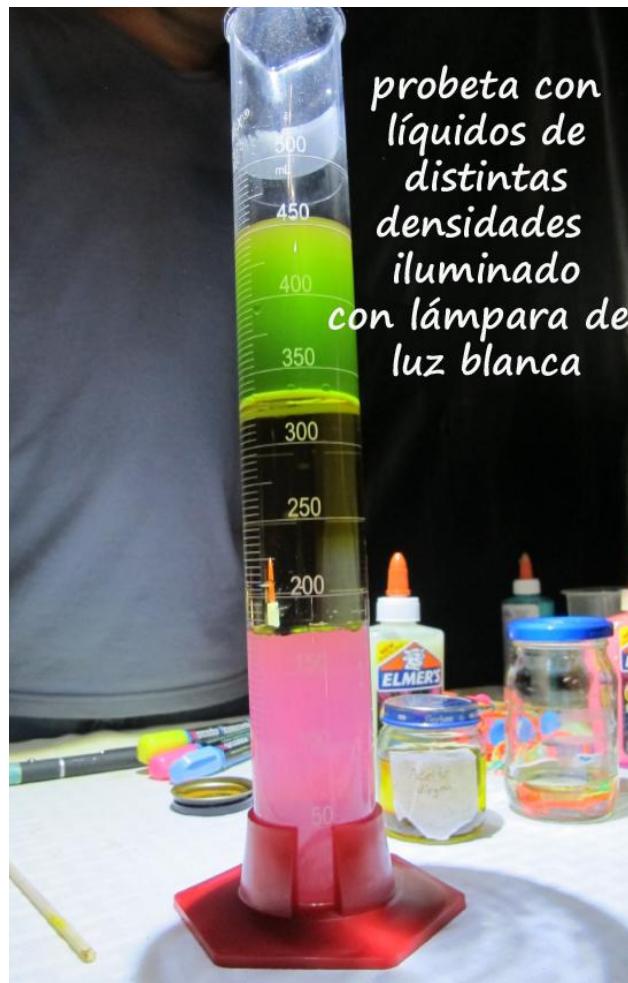


Experimento 3. Líquidos fluorescentes. Consigue un recipiente transparente con agua tónica, es una bebida que contiene quinina. Ilumina el recipiente con luz blanca, un láser rojo y un láser verde. Observarás que no hay ningún cambio en el líquido. Ahora, con una lámpara de luz ultravioleta o un láser violeta ilumina el agua tónica, y notarás que ésta cambia a un color azulado. Cuando dejas de iluminar con la luz ultravioleta este efecto acaba instantáneamente. Debido a su estructura atómica, líquidos como el agua tónica absorben luz en ultravioleta y emiten luz con menos energía, en este caso azul. La explicación para el fenómeno de fluorescencia es el mismo que la fosforescencia, pero en este caso los tiempos de absorción y emisión son prácticamente instantáneos. Hay muchos líquidos que tienen este fenómeno.

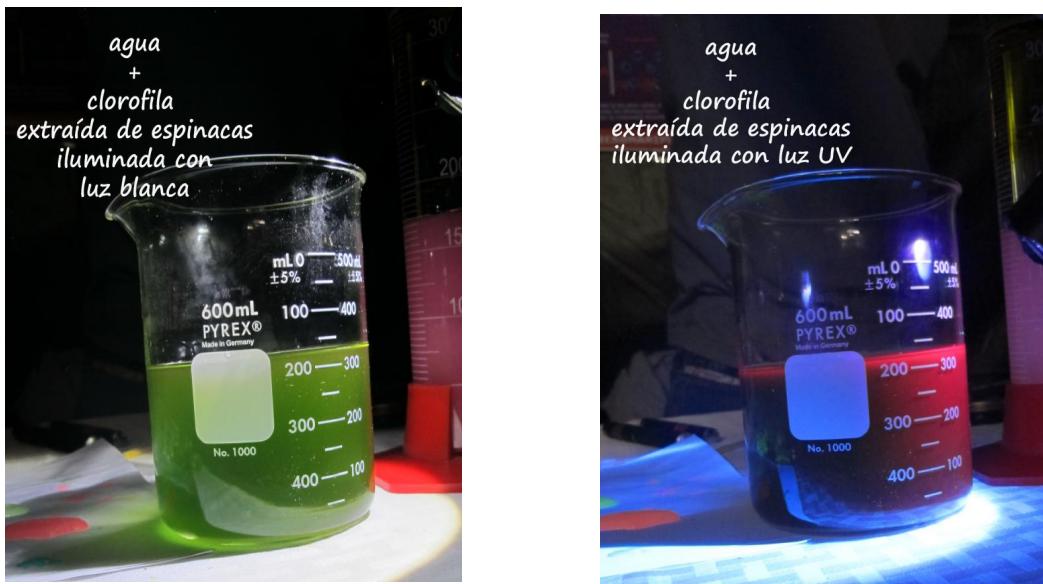
Ejemplos

- Compara aceites. Puedes usar aceite vegetal y aceite de oliva virgen. Notarás que fluorescen de distinto color cada uno. Las industrias usan este método para el control de calidad de aceites.
- Prepara un líquido con marcatextos fluorescente y observa que en verdad fluorescen. También usa jarabe de maíz, éste también fluoresce.
- Puedes conseguir un pedazo de fluorita, que es un mineral que presenta este efecto, al que se debe el nombre de este fenómeno.
- Haz una guía de onda fluorescente con líquidos de distinta densidad. Usa aceites, agua, jarabe de maíz, agua quina, etc.





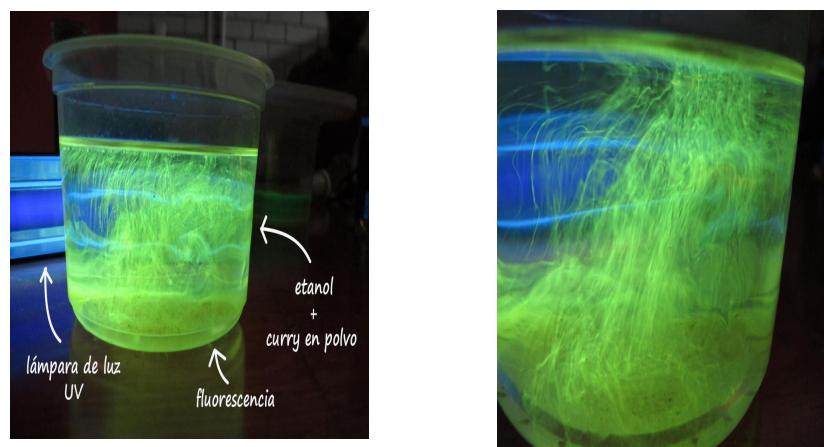
Experimento 4. Los seres vivos también fluorescen. Toma algunas hojas verdes de las plantas. Una recomendación es usar espinacas frescas. Machaca con etanol las hojas hasta extraer un líquido verde, esta sustancia es la clorofila. Ilumínalo con luz ultravioleta y verás que la clorofila cambia a un color rojizo. La composición molecular de la clorofila hace que exista la fluorescencia. Esta absorbe la luz UV y emite en una luz con menos energía, en este caso la roja. Te sorprenderá saber que además de las plantas muchos seres vivos presentan el fenómeno de fluorescencia. Muchas especies de plantas, pero también de peces, hongos e insectos presentan este fenómeno de fluorescencia.



Experimento 5. De objetos no fluorescentes a fluorescentes. Comprueba que el etanol no fluoresce. Consigue curry o cúrcuma en polvo y nota que este polvo tampoco fluoresce. Ahora ilumina con luz UV un recipiente lleno de etanol y espolvorea un poco de curry o cúrcuma. Observarás fluorescencia cuando éstos empiezan a mezclarse. ¡Se ha pasado de dos sustancias que no eran fluorescentes a una fluorescente al mezclarse! Puedes probar con agua en vez del etanol y verás que no tiene este efecto.

Ejemplos:

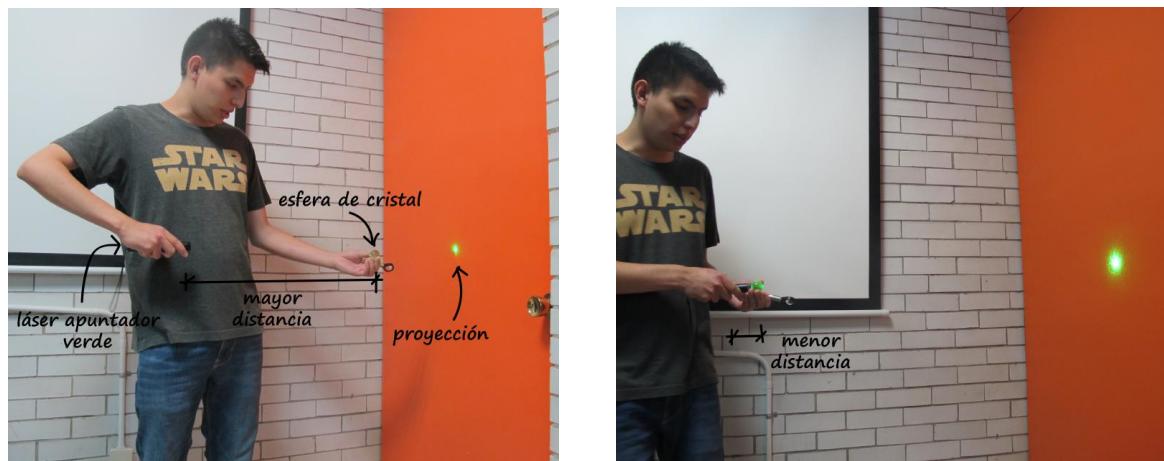
- Otra prueba muy vistosa es que si se tiene agua tónica y se le agregan gotas de amoniaco ésta perderá su fluorescencia. Pero también puedes probar con algo de vinagre y notarás que recupera la fluorescencia.



OBSERVANDO UN ZOOLÓGICO DE MICROORGANISMOS EN UNA GOTA

Objetivo: Ilustrar el funcionamiento de un microscopio de sombras que puede ser hecho en casa. Observar los microorganismos que habitan en una muestra de agua sucia.

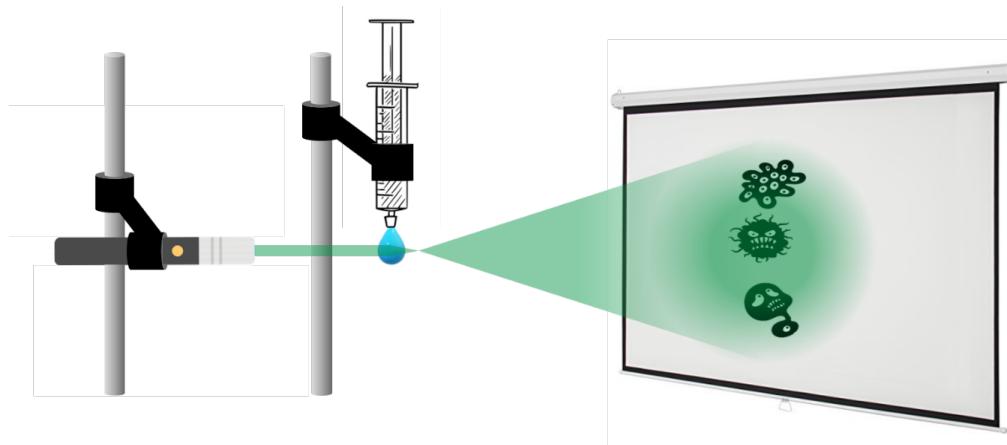
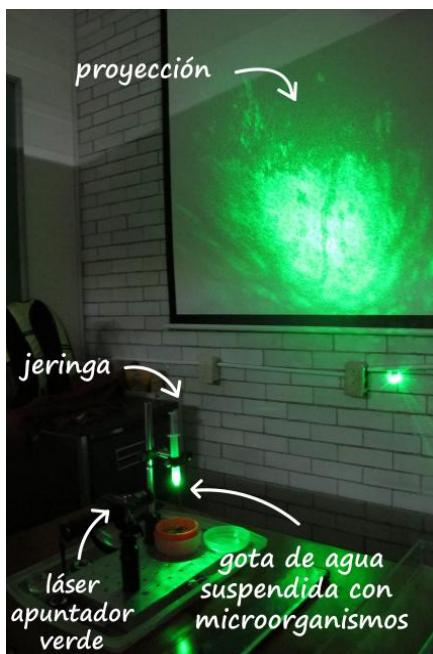
Introducción: El principio de un microscopio es ver cosas pequeñas y para ver cosas pequeñas hay que magnificarlas. Todos hemos jugado con una lupa magnificando imágenes, letras o insectos. Una lupa es un lente. Las lentes aprovechan un cambio en el índice de refracción para doblar la luz, su forma generalmente es curva para concentrar rayos paralelos, los de un láser, por ejemplo, en un solo punto que llamamos el foco de la lente. Todos hemos visto cómo se pueden quemar hormigas con una lupa en el sol, espero que no todos lo hayan hecho. Podemos suponer que en este caso, el sol manda rayos paralelos a nuestra lente y ésta concentra todos los rayos que le llegan, en un solo punto, en el que la luz es tan intensa que puede quemar cosas. Una vez pasado el foco, los rayos continúan su camino expandiéndose (divergiendo). Podemos ver el ejemplo con una esfera de cristal, que no precisamente es una lente, pero funciona como una, y se puede ver claramente cómo se expande el haz de un láser a través de ella. Entre más pequeña es la gota mayor será su poder de concentración y de expansión.



Experimento

Para este microscopio necesitamos una fuente de iluminación láser, agua sucia (el agua de una pecera funciona muy bien), una jeringa y una zona donde proyectar.

Se recomienda recortar la punta de la aguja de la jeringa, para formar una gota bien redondita con el líquido. Una jeringa de insulina es una buena opción. La parte crítica del experimento es colocar la gotita de agua que se forma en la punta de la jeringa exactamente enfrente del camino de la luz del láser. Un soporte universal con nueces es suficiente. Finalmente, la pantalla puede ser cualquier pared y en un ambiente oscuro podrán ser proyectadas las sombras de los objetos que se encuentran dentro de la gota. Es bueno aprovechar el hecho de que podemos conseguir microorganismos vivos en cualquier parte, y si se tiene suficiente estabilidad en el experimento, podremos observar su movimiento.



Explicación

¿Por qué un láser?

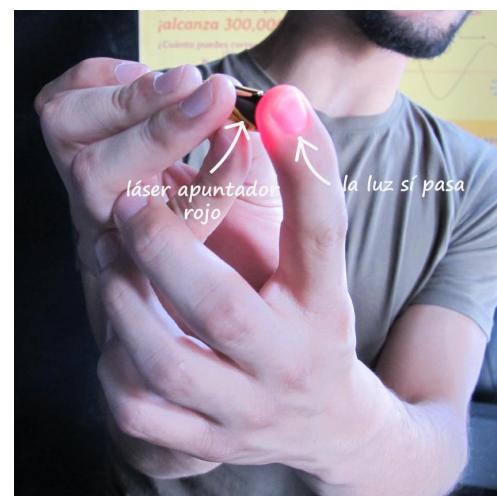
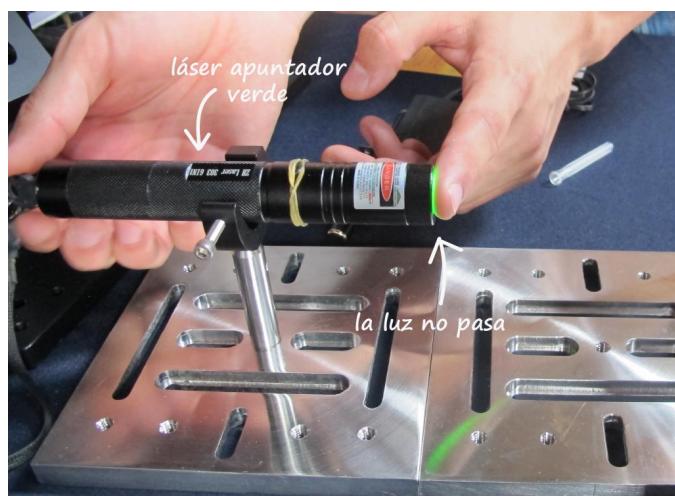
Usamos un láser porque nos importa que la iluminación sea de una intensidad suficiente alta para ser proyectado después de diverger y al mismo tiempo toda esta luz pueda pasar a través de la gota.

¿Qué vemos?

Lo que nos importa es donde no estamos viendo luz, es decir, donde estamos viendo sombras. Lo que logramos ver proyectado la luz del láser que pasa por la gota son las sombras expandidas de lo que se encuentre dentro de la gota, por lo que se pueden proyectar a prácticamente cualquier distancia. El límite depende principalmente de la intensidad del láser, la transparencia de la gota y la oscuridad del cuarto.

¿Qué color?

El color verde es muy bueno para observar microorganismos vivos ya que las cosas vivas como nosotros mismos, solemos absorber más la luz de longitud de onda verde que la longitud de onda roja, por ejemplo. Una prueba rápida para ver si eres un ser vivo es poner un rayo láser rojo en tu dedo y observar que lo atraviesa una buena cantidad de la luz. Si en cambio pones un rayo láser verde en tu dedo no observarás luz del otro lado. Por lo tanto, los microorganismos vivos hacen una mejor sombra si iluminamos con luz verde, con diferentes muestras se podrán usar distintos colores.



Extras

La aplicación más cercana a este fenómeno es la caracterización de partículas o materiales por la luz que absorban, transmitan o difracten.

Podemos hacer gotas con palillos, alambres y ni siquiera tienen que ser esféricas, en esencia sólo buscamos divergencia por lo que lentes divergentes pueden ser creadas con aros lo suficientemente pequeños como para que, con ayuda de la tensión superficial, se forme una lente divergente.

Nunca se especificó un tipo de muestra por lo que podemos hacer un “Zoológico Microscópico” con gotas de todo el mundo, no sólo microorganismos, sino, todas las clases de micropartículas que puedas colocar en una gota de alguna solución transparente.

Poniendo atención alrededor de las sombras, también seremos capaces de observar patrones de difracción.

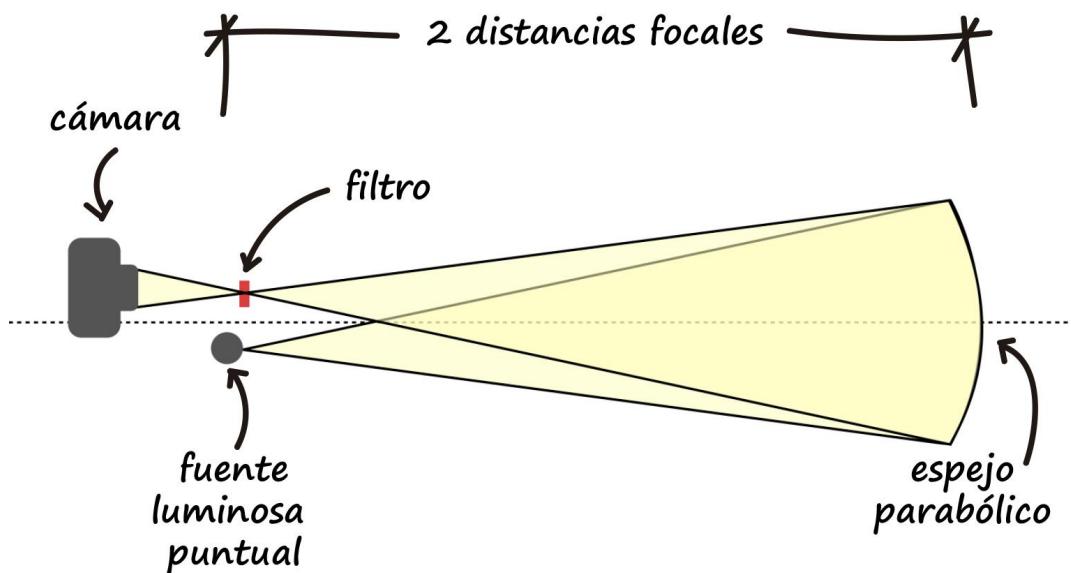
SCHLIEREN

Objetivo: Visualizar, con un montaje de efecto Schlieren, los cambios de densidad que sufre el aire cuando hay fuentes de temperatura cercanas (o cambios de presión). Impresionar al observador mostrando que es posible ver el calor que sale de sus manos o de una llama de fuego, por ejemplo.

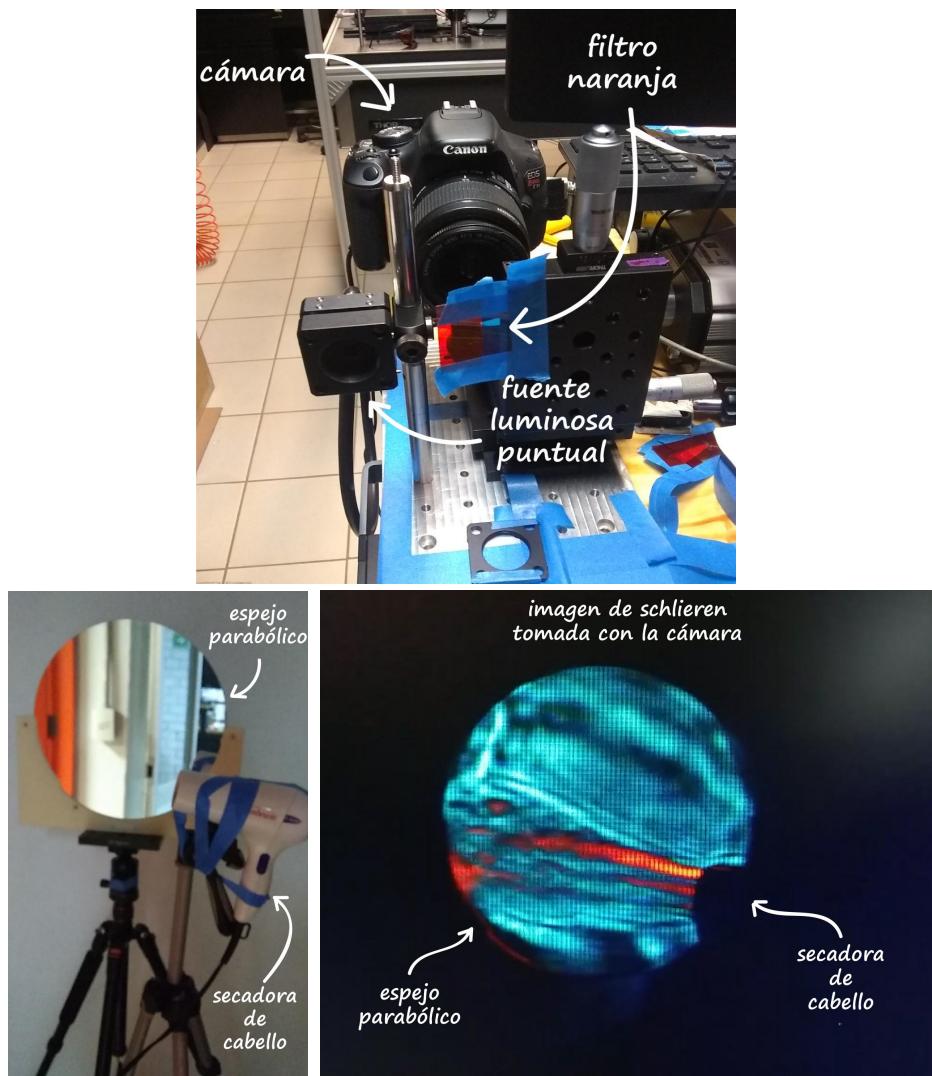
Introducción: Cuando el aire sufre cambios de temperatura o presión, su densidad también se ve afectada y en consecuencia cambia su índice de refracción, por lo cual la luz que pase por las zonas de aire caliente o frío sufrirá pequeñas desviaciones en su trayectoria normalmente rectilínea. Este efecto lo podemos observar cotidianamente al observar por ejemplo parrillas calientes, o espejismos en la carretera. El efecto Schlieren nos permite magnificar este efecto para poder visualizar pequeñas diferencias en la densidad del aire.

Montaje

Se coloca una fuente de luz puntual e intensa (en nuestro caso se usó una fibra óptica con un pinhole de 30 micras) a dos veces la distancia focal de un espejo parabólico, de manera que la imagen de la fuente puntual se forme a la misma distancia (como en la figura). En el punto de formación de la imagen se coloca un objeto obstructor o filtro de color, que bloquee parte de la luz que se desvía al viajar por el arreglo.



Detrás del objeto obstructor se monta una cámara, con la cual se enfoca el espejo. Hay que asegurarse de que la luz reflejada de la fuente puntual entre al objetivo de la cámara.



Comentarios

Es importante estabilizar las diferentes partes del montaje, en especial el espejo. Para el objeto obstructor se probaron distintas opciones, como el filo de una navaja, una aguja de jeringa o un cabello, los mejores resultados se obtuvieron con el cabello. Similarmente se probaron con distintas combinaciones de filtros de color, ya sea usando un solo filtro o una interfaz entre dos de colores distintos, el efecto más vistoso se obtuvo con la interfaz entre un filtro rojo y otro azul, especialmente cuando se tienen diferencias de temperatura suficientemente grandes.

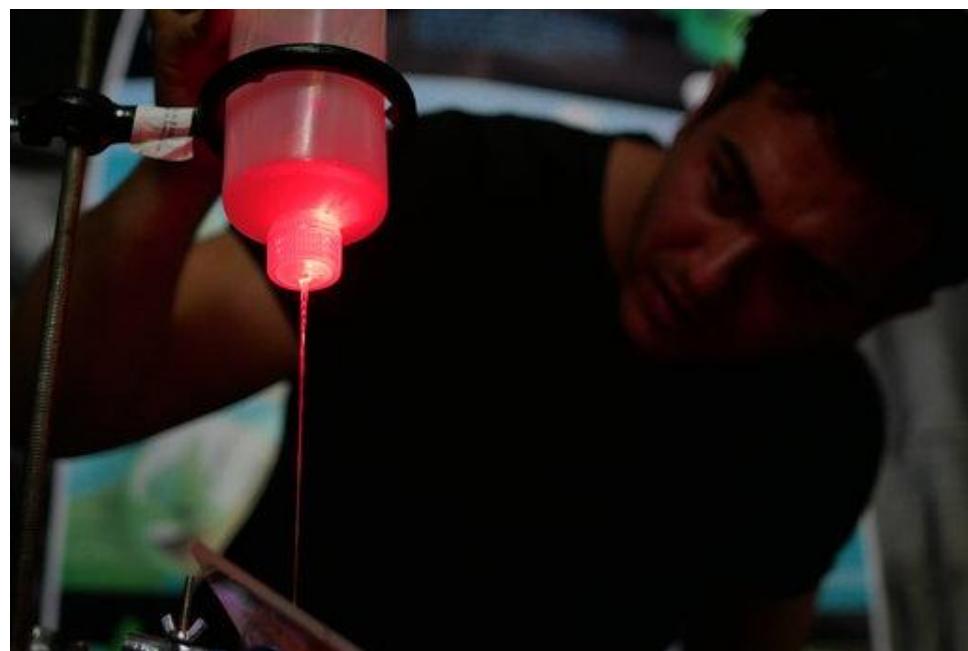
Explicación

La luz viaja de la fuente puntual al espejo y regresa de manera convergente al objeto obstructor. Si hay fuentes de calor en el camino de la luz, esta se desviará. Es por esto que entre mayor sea la distancia focal del espejo la desviación de la luz será más apreciable. Cuando se utiliza un cabello lo que sucede es que cuando la luz se desvía, ya no incide en el cabello y donde se veía la sombra del cabello ahora veremos la luz desviada por el calor. En el caso dos filtros de color, la luz desviada que antes pasaba por un color ahora pasa por el otro (véase la imagen de arriba en la que se observa el flujo de aire caliente generado por una secadora de cabello).

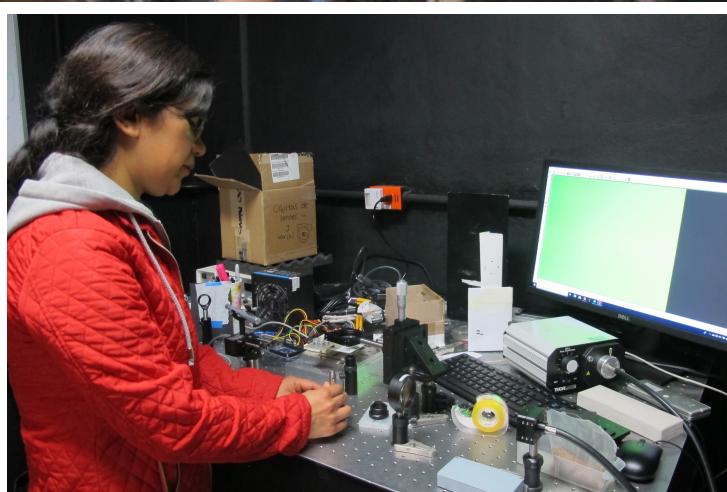


GALERÍA DE FOTOS











VOLANTES EXPLICATIVOS

Levitación Óptica

Partícula Levitada

Micro- y nano- partículas sólidas o líquidas pueden ser levitadas en aire o vacío.

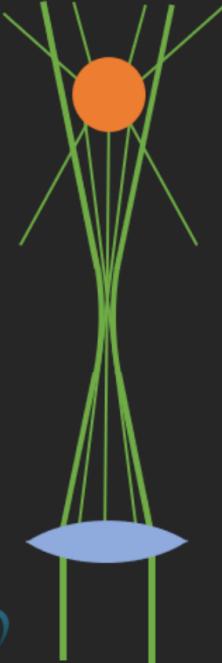
Reflexión, refracción y absorción

Al cambiar de dirección o ser absorbida, la luz ejerce fuerzas sobre la partícula.

Trampa Óptica

Un haz láser dirigido verticalmente es ligeramente enfocado con una lente para crear la trampa.

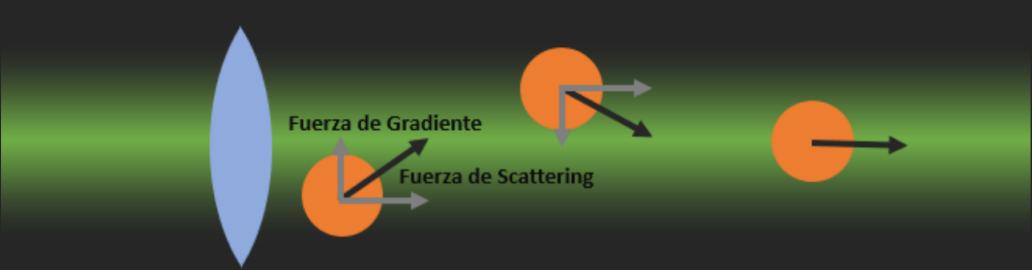
Visita la página del lab!
<http://labmopt fisica.unam.mx/>



Guía de Partículas

Micro-partículas suspendidas en agua

Son empujadas en la dirección del láser y hacia el centro del haz.

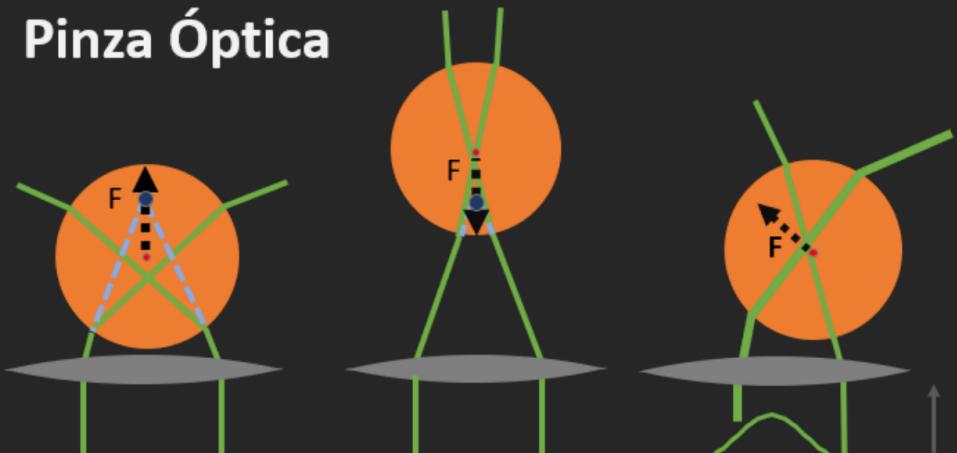


Láser ligeramente enfocado

Visita la página del lab!
<http://labmopt fisica.unam.mx/>



Pinza Óptica



Fuerza de Gradiente

Los haces de luz provenientes de un láser fuertemente enfocado provocan fuerzas que capturan a la partícula en el foco.

Visita la página del lab!
<http://labmopt fisica.unam.mx/>

