

*En este mundo traidor,
nada es verdad ni es mentira,
todo es según el color
del cristal con que se mira.*

Ramón de Campoamor

CONTENIDOS

- Óptica geométrica:
 modelo del rayo de luz
- Principio del tiempo mínimo
- Reflexión
- Refracción
- Espejos y lentes
- Óptica física
- Interferencia
- Difracción
- Colores

14 LOS FENÓMENOS LUMINOSOS

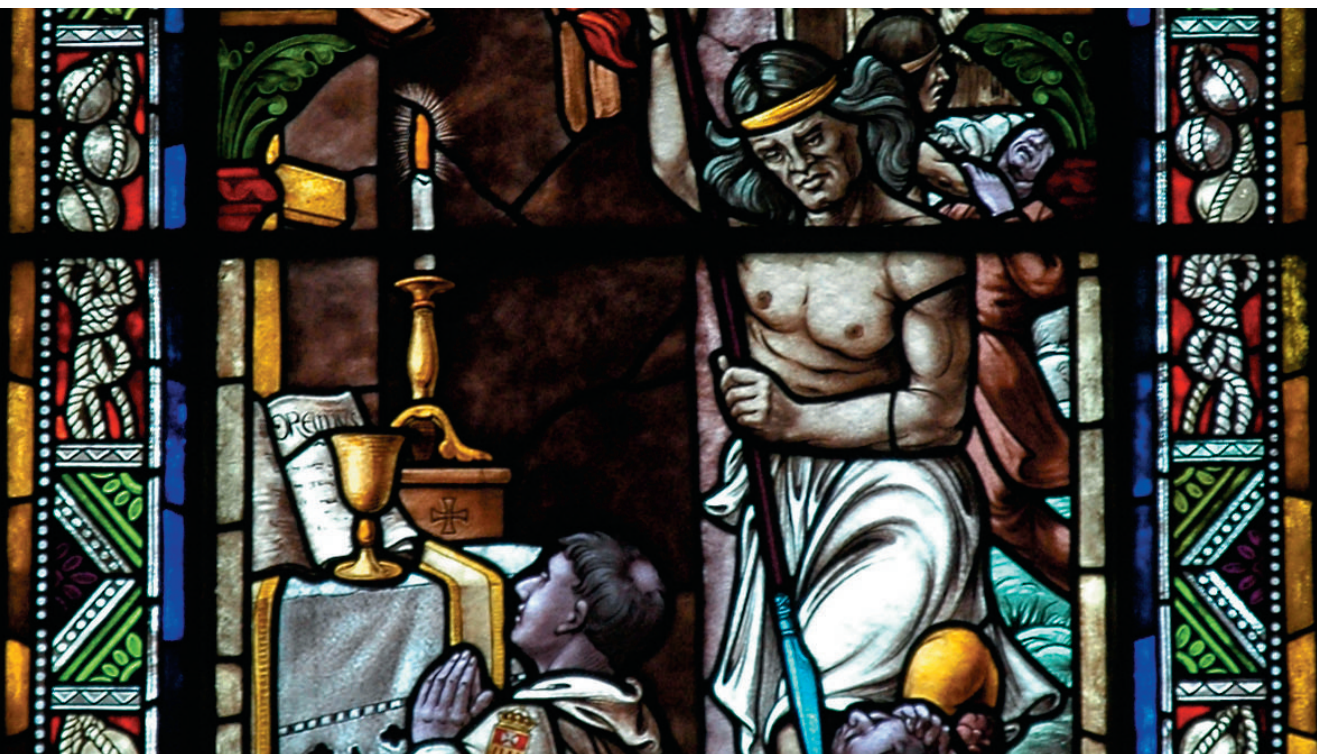
Existe una confianza muy grande en el valor de verdad de la información obtenida por los ojos. Se dice "ver para creer" dando por seguro que no es posible ser engañados por este sentido. Pero, *¿cuánto hay solo de aparente y cuánto de real en las imágenes percibidas?*

Por otra parte, frecuentemente se asocia a la sabiduría con la iluminación, a la comprensión con ver más claro y a una idea nueva con una lamparita encendida. También, cuando algo sorprende mucho, suele decirse que deslumbra.

Indudablemente, la luz tiene una importancia fundamental en la vida del hombre. El sentido de la vista es el que más influye en la capacidad de interacción con el entorno. No es raro, entonces, que en todas las épocas los fenómenos luminosos hayan atraído la curiosidad del hombre y alentado la formulación de distintas teorías para explicarlos. Algunas de ellas están incluidas en las próximas páginas.

En este capítulo se analizará cuánta información acerca de lo que un objeto es, viene con la luz reflejada por él, y también cómo se forma y adquiere sus características propias la imagen percibida. Se buscarán explicaciones para algunos fenómenos cotidianos y para otros no tan evidentes aunque igualmente accesibles a la observación.

La parte de la física que estudia los fenómenos asociados con la luz se denomina **Óptica**. Se aplica a un sector del espectro electromagnético que abarca las longitudes de onda visibles a los ojos y sus alrededores próximos, es decir las zonas del ultravioleta y del infrarrojo. A pesar de esto, los principios de la Óptica también pueden extenderse a otras regiones del espectro.



Rosetón de la catedral de La Plata.

La luz a veces surge de los cuerpos, que son llamados, por este motivo, fuentes luminosas. Otras veces, los cuerpos aparecen iluminados porque solo reflejan una luz que no es propia. Los cuerpos pueden clasificarse en:

- **transparentes**, si casi toda la luz que incide sobre ellos, denominada luz incidente, los atraviesa;

- **traslúcidos**, si solo los atraviesa una parte de la luz incidente.

- **opacos**, cuando la porción de luz que logra pasar es mínima.

Más adelante se analizará si estas categorías de opaco y transparente pueden ser enunciadas en términos absolutos para un cuerpo, o dependen también del tipo de luz que los ilumina.

Los fenómenos asociados a la luz, tanto sea la propia como la que le llega a un cuerpo e interactúa con él, cuentan en la actualidad con teorías físicas que los explican y permiten el desarrollo de tecnologías aplicadas a los más diversos campos.

Por ejemplo, la luz que llega hasta la Tierra procedente del Sol, de otras estrellas y galaxias puede ser interpretada y es posible conocer, de este modo, algunas de sus características a pesar de que son objetos muy lejanos. Para ello se utilizan técnicas de teledetección basadas en la interpretación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por los cuerpos y que son aplicadas a la investigación de muy diversos problemas.

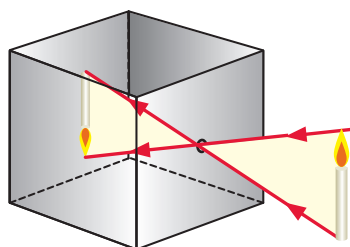
Con cierta limitación, también es posible comprender la interacción de la luz con los organismos vivos, como por ejemplo el complejo proceso de **fotosíntesis** o el comportamiento denominado **fototropismo** por los biólogos.

El grupo de fenómenos que atañen a la luz es muy grande. En este libro se apuntará solo a los modelos interpretativos más básicos que permitan la comprensión de algunos hechos cotidianos y otros que, aunque no lo sean tanto, resultan igualmente importantes por sus implicancias tecnológicas, históricas o sociales.

Los vitraux

Durante el siglo XIII, surgió en Europa un movimiento arquitectónico, aplicado sobre todo a la construcción de catedrales, que algunos llamaron arquitectura radiante. Este movimiento consistió en el reemplazo de los muros por láminas de vidrio de colores. La luz proyectada era interpretada simbólicamente como el reflejo de la luz celestial. Esta manera de desmaterializar las paredes de los templos intentó reproducir lo sobrenatural en dicho espacio de culto.

Propiedades de la luz



Cámara oscura

Solo si el agujero es suficientemente pequeño, se produce una imagen nítida del objeto sobre la pantalla. Los rayos que tienen una inclinación adecuada ingresan al interior de la cámara y logran llegar, manteniendo su trayectoria, hasta la pantalla donde se forma la imagen invertida del objeto.

Para poder leer la información contenida en esta página es necesario que el papel reciba luz desde alguna fuente luminosa, por ejemplo el Sol, o una lámpara, y que se refleje de modo de llegar hasta los ojos de quien lee. La luz debe ser suficientemente intensa y preferentemente blanca. La mejor ubicación para quien lee es justamente delante del texto, aunque es cierto que alguien ubicado hacia un costado también puede ver lo que está escrito, dentro de ciertos límites.

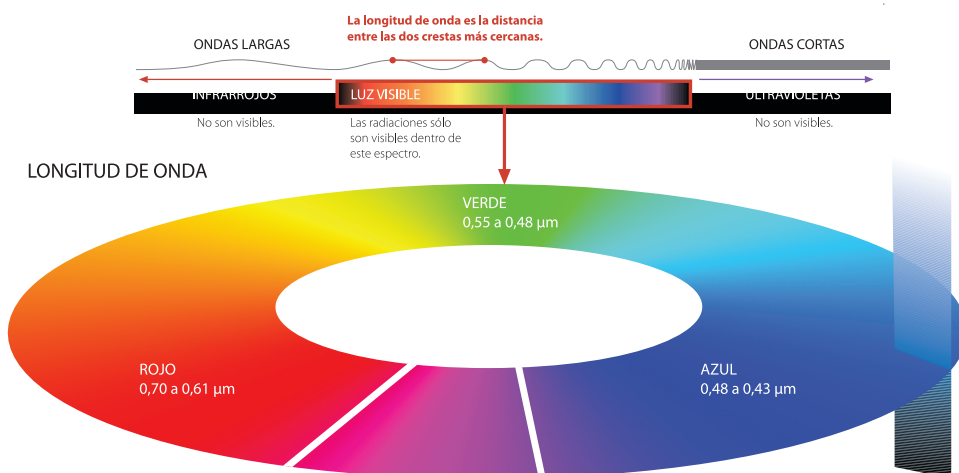
Hay un conocimiento intuitivo de los fenómenos luminosos que permite afirmar que la luz viaja en línea recta hacia la página y luego rebota, siempre en línea recta, para llegar hasta los ojos del lector. Esta intuición se basa en la idea de **rayo luminoso**. Es posible aceptar que un rayo de luz se visualiza cuando, por ejemplo, se observa que éste penetra a través de un pequeño orificio y se dispersa en las pequeñas partículas de polvo en suspensión en el aire.

La consideración de que la luz se propaga en línea recta puede explicar el funcionamiento de la **cámara oscura**. Se trata de la técnica más sencilla para obtener una imagen de un objeto luminoso o iluminado. Fue conocida desde la Antigüedad; las primeras noticias son del siglo III a.C. y recibió el nombre de *camera obscura* en el Renacimiento cuando fue usada habitualmente por pintores.

Una de las propiedades de la luz blanca es que puede descomponerse en los colores del arco iris y que si se reúnen estos colores se puede percibir luz blanca. Para explicar estos hechos es necesario recordar que cada color corresponde a luz de una determinada longitud de onda, que no es reflejada por igual por las distintas superficies.

Por otra parte, cabe destacar que en la percepción de un color están presentes propiedades fisiológicas, referidas a los receptores fotosensibles ubicados en la retina del ojo.

Otra de las propiedades de la luz es el **brillo**. Si bien se trata de una percepción que, como tal, no está ajena a consideraciones biológicas y psicológicas, en Física se relaciona con la densidad superficial de la energía emitida por la fuente por cada unidad de su superficie. Es posible entender entonces por qué un brillo débil, como el de una estrella es difícil de captar, por ejemplo, en una fotografía.



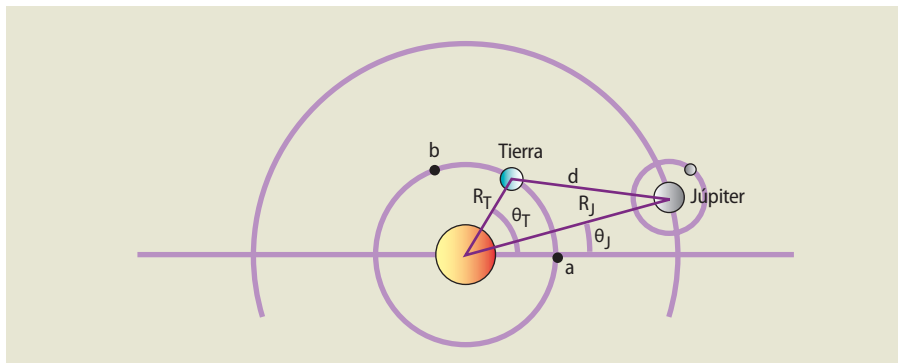
Nuestros ojos son sensibles a una franja muy angosta del espectro electromagnético.

La velocidad de la luz

La luz viaja a velocidades muy altas. De hecho, en algún momento se pensó que su propagación era tan infinitamente rápida que podía considerarse instantánea. Las primeras experiencias para medir esta velocidad fracasaron debido a que los diseños experimentales no resultaban de la precisión requerida por el orden de magnitud de la velocidad de la luz, cuyo valor indicado como c , es $300\,000\,000\text{ m/s} = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ aproximadamente, como todas las ondas electromagnéticas en el vacío.

La primera medición efectiva de la velocidad de la luz la obtuvo Olaf Roemer (1644-1710) a partir de un cálculo que se conoce como **método astronómico**. Se basa en la explicación de un retraso de algunos segundos entre el tiempo esperado y el efectivamente medido del eclipse de uno de los satélites de Júpiter. Roemer interpretó estos resultados como el tiempo que tardaba la luz en recorrer la distancia que separaba las distintas posiciones en su órbita. Obtuvo un valor de $298\,000\text{ km/s}$, muy cercano al aceptado actualmente.

El período entre dos eclipses para una de las lunas de Júpiter es aproximadamente $42,5\text{ h}$. Se obtienen valores mayores cuando las mediciones se efectúan en las posiciones en que la Tierra está más, alejada ya que la luz debe recorrer más distancia.



Al girar la Tierra en su órbita, la distancia d que recorre la luz desde Júpiter es mayor. Teniendo en cuenta ese valor y el retraso en el período de las lunas de Júpiter, Roemer calculó la velocidad de la luz.

Al mejorar los diseños experimentales destinados a la medición de la velocidad de la luz en distintos medios materiales, se probó que su velocidad de propagación en cualquier medio es menor que este valor en el vacío. Por ejemplo, la medición que realizó Jean Foucault (1819-1868) probó que la velocidad en el agua era menor que la que había sido medida en el vacío. Esta comprobación resultó crucial para decidir entre la teoría ondulatoria y la corpuscular, que predecía un resultado distinto derivado de una eventual aceleración de las partículas de luz por la interacción gravitatoria entre sus masas y la de las partículas del material que atravesaba.

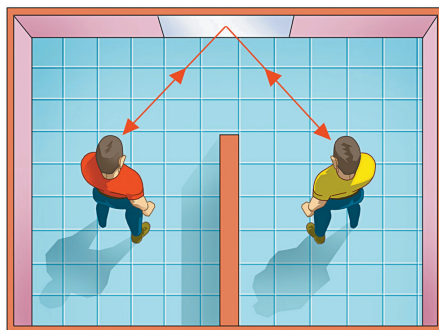
En la actualidad, la velocidad de la luz se mide con tanta precisión que puede ser usada como parámetro en otras mediciones indirectas. Por ejemplo, la distancia entre la Tierra y la Luna fue medida en 1969 por los astronautas de la Apolo XI que instalaron en la Luna un retrorreflector, tipo ojo de gato, que reflejaba un pulso láser disparado desde la Tierra, con lo que logró así una precisión menor a 10 cm .

En sus escritos, Galileo representó sus discusiones con otros pensadores de su época por medio de un diálogo entre tres personajes: Salviati, Sagredo y Simplicio. Simplicio era dogmático y discutía con Salviati que era el encargado de exponer los argumentos de Galileo. Sagredo mediaba entre ambos. En uno de sus diálogos, que figura en el libro *Dos nuevas ciencias* (1638) se expone lo que piensa el autor acerca de la propagación de la luz: "Simplicio: La experiencia cotidiana nos muestra que la propagación de la luz es instantánea; porque cuando vemos que se dispara un cañón a gran distancia, el fogonazo llega a nuestros ojos sin que transcurra ningún tiempo, mientras que el sonido llega a nuestros oídos solo después de un intervalo perceptible. Sagredo: Bien, Simplicio, lo único que yo puedo inferir de esta experiencia tan común es que el sonido al llegar a nuestros oídos viaja más lentamente que la luz. No me informa si la llegada de la luz es instantánea o si, aun cuando sea sumamente rápida, de todas maneras invierte algún tiempo."

Las teorías de la luz
Durante el siglo XVII, dos importantes físicos propusieron teorías antagónicas para explicar qué es la luz. **Isaac Newton** proponía que la luz está constituida por un haz de partículas, en tanto que el holandés **Cristian Huygens** (1629- 1695) explicó los fenómenos ópticos a partir de un modelo ondulatorio.

Elementos de óptica geométrica

Si se observa a los ojos a una persona mediante un espejo, hay que considerar que también ella podría ver a quien lo mira, en iguales condiciones. El camino óptico es reversible.



La **óptica geométrica** se basa en el concepto de rayo luminoso, asociado a la idea de la dirección en que se propagan las ondas. Los rayos se trazan perpendiculares a los frentes de onda y apuntando en el sentido de su propagación.

La geometría es la herramienta teórica que permite realizar la representación e interpretación de algunos hechos. Dentro de ciertos límites, este modelo resulta

adecuado para la interpretación sencilla de fenómenos en los cuales la luz puede ser considerada como un conjunto de rayos que viaja por materiales homogéneos y transparentes desde los cuerpos que la emiten o reflejan.

Una característica importante dentro de los límites de validez de este modelo es que el camino que sigue la luz entre dos puntos es el mismo en cualquier sentido que se lo recorra, es decir, a la ida y a la vuelta. A este hecho se lo llama **reversibilidad** del camino óptico.

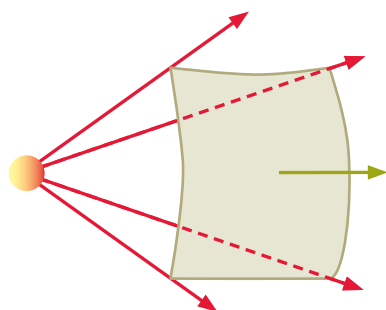
Separando la luz de las sombras

Uno de los juegos más antiguos llamado *sombras chinescas*, consiste en la obtención de figuras por proyección de sombras.

En ellas, la ilusión que se desea crear se logra interponiendo entre una fuente de luz y una superficie de proyección, las manos entrelazadas de manera particular. Se ve entonces una zona iluminada rodeando otra oscura, donde no llega luz. Allí es donde se forma una zona que crea la ilusión de lo que se desea representar, al considerarla como su sombra.



A veces, la zona de sombra está rodeada por otra zona menos oscura, de idéntico contorno, que se llama **penumbra**. Se pueden observar zonas de sombra y penumbra siempre que un objeto opaco se interpone entre una fuente de luz extensa, es decir no puntual. La clasificación de las fuentes en puntuales o extensas no depende del tamaño real de la fuente de luz, sino de su tamaño relativo asociado con la distancia que la separa del objeto que se interpone. Por ejemplo, una estrella, por su lejanía, puede ser considerada una fuente puntual de luz, a pesar de ser, en general, de tamaño mucho mayor que cualquier objeto, incluido a la Tierra. En cambio, en una habitación oscurecida, es posible observar la sombra y penumbra proyectadas sobre una pared por la luz de una linterna o la proveniente de la llama de una vela, si se coloca una mano delante de cualquiera de ellas.



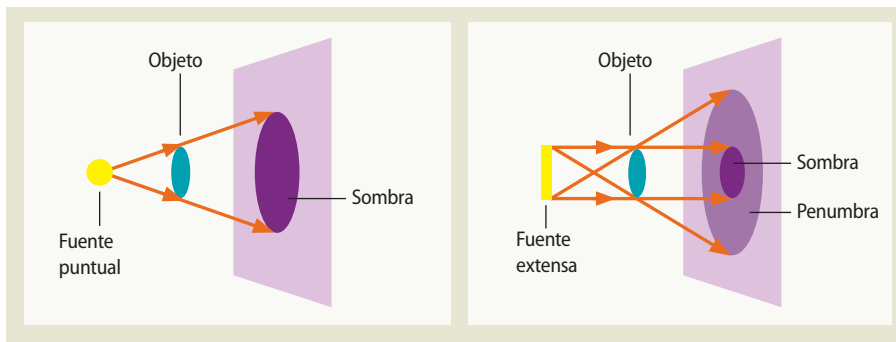
En el modelo de rayos luminosos, éstos se dibujan perpendiculares a los frentes de onda.

► Todo cuerpo que emite radiación luminosa se denomina **fente luminosa**. Cuando sus dimensiones son muy chicas frente a las restantes dimensiones del problema considerado, se llama **fente puntual**.

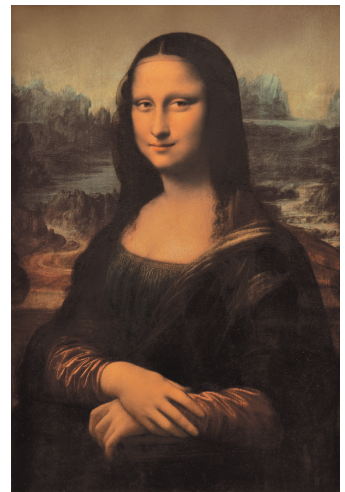
Una zona se considera de **sombra** cuando la luz proveniente de una fuente luminosa u objeto iluminado no llega a ella debido a la intersección por parte de un objeto opaco.

Una zona es de **penumbra** cuando la luz proveniente de una fuente no puntual u otro objeto es parcialmente interceptada por un objeto opaco.

Se puede comprender este fenómeno de manera muy simple a partir del modelo geométrico.

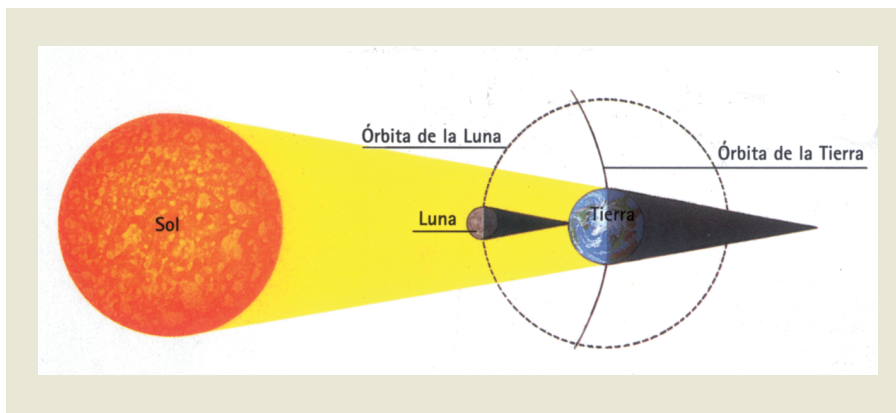


Un ejemplo muy importante de este fenómeno ocurre en los eclipses de Sol, cuando la Luna se interpone entre éste y la Tierra. Debido al gran tamaño del Sol y su relativa cercanía, es una fuente de luz extensa, que permite la proyección de sombra y penumbra. Si la zona de la Tierra desde la cual se observa el eclipse está en la primera región, se podrá experimentar un período de oscuridad en pleno día. Si se está en la zona de penumbra, es notoria la sensación de disminución del brillo de la luz solar.

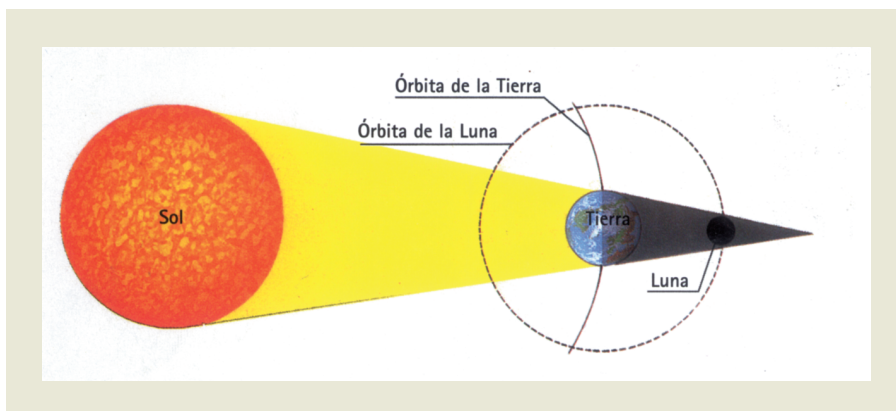


La Gioconda de Leonardo da Vinci.

En dibujo, el estudio de las luces y las sombras tiene una gran importancia porque es parte de las claves para dar ilusión de tridimensión a la imagen plana. Leonardo da Vinci (1452- 1519) expone en su *Tratado de pintura* lo siguiente acerca de las dos naturalezas de la luz: "Es separada la luz que ilumina a un objeto e inseparable aquella que participa por esa luz del objeto iluminado. La primera recibe el nombre de primitiva, llamándose a la otra derivada. Del mismo modo, también la sombra posee dos naturalezas distintas, una llamada primitiva y otra derivada. Es primitiva aquella que no puede separarse de los objetos y derivada la que sí se separa de éstos, arrastrando hasta la pared la forma de aquello que es su causa."



Por otra parte, a veces la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, proyectando su sombra y penumbra.



Un eclipse de Sol es normalmente visible solamente desde algunas regiones del planeta, en cambio el eclipse de Luna es apreciable para todo observador ubicado en el hemisferio que se encuentre de noche.

Principio de Fermat

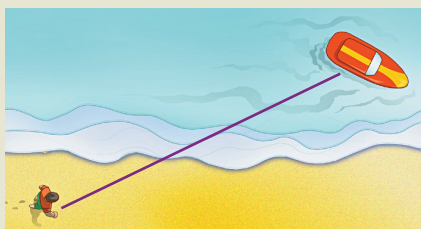
Los autores de la antigüedad clásica no resolvieron el dilema emisor-receptor al referirse a la naturaleza de la luz. No estaban de acuerdo sobre si los rayos pasan del objeto al ojo o del ojo al objeto. Demócrito, Aristóteles, Epicúreo y Lucrecio eran partidarios de la primera teoría, mientras que Euclides, Empédocles y Tolomeo lo eran de la segunda. La idea de la emisión de rayos visuales fue indudablemente útil y avanzada para su tiempo, ya que permitió elaborar una teoría acertada de la formación de las imágenes en los espejos

¿Cuál es la manera más rápida para recorrer la distancia que separa dos puntos?

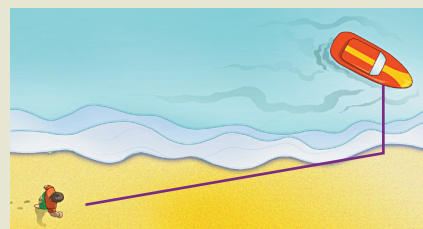
La respuesta es que el camino más rápido es aquél que sigue la luz para ir desde un punto hasta el otro. Si los dos puntos se encuentran en un mismo medio material, este camino es un segmento de recta que une a los puntos. Pero, si los puntos se encuentran en medios distintos, entonces puede no serlo.

Por ejemplo, en una película de suspenso, si el héroe está siendo perseguido e intenta huir corriendo en dirección hacia la playa, donde nadará hasta un bote que lo espera para rescatarlo, intentará seguir el camino más rápido, ya que es el que le dará mayores posibilidades de éxito.

El camino más rápido es, en principio, el que une el punto inicial de su huida y el bote en línea recta.

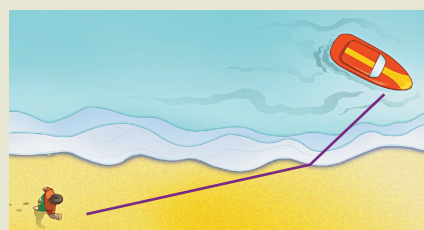


Sin embargo, como se corre más rápido que lo que se nada, es mejor correr más y nadar menos. La mejor opción, entonces, podría ser aquella en la cual se corra al máximo y se nade lo mínimo indispensable.



El Principio de Heron dice que: "El rayo, sea o no reflejado, sigue siempre el camino más corto entre el objeto y el ojo".

Probablemente se note que lo que se corre de más puede significar un aumento de tiempo superior a lo que se ahorró al nadar menos. Por lo tanto, la solución más conveniente podría ser algo intermedio como:



Este razonamiento fue elaborado por Herón (siglo II a. C.) y enunciado con toda precisión por Pierre de Fermat en 1657. En el principio que lleva su nombre se afirma que:

La luz se propaga siempre a lo largo de aquella trayectoria que le suponga el mínimo tiempo, incluso si para lograrlo tuviera que desviarse del camino geoméricamente más corto.

Formación de imágenes con la cámara oscura

El objetivo de esta actividad es obtener imágenes mediante la técnica sencilla conocida como cámara oscura y aplicar los principios básicos de la óptica geométrica.

Materiales

Una caja de cartón con tapa. Algún elemento punzante. Una tijera o una trincheta. Papel translúcido. Unos pedazos de cartón para cortar tarjetas. Goma o cinta para pegar. Una vela.

Procedimiento

1. Corten ventanas, bastante amplias, en dos caras opuestas de la caja de cartón.
2. Cubran una de las ventanas con el papel translúcido, el cual oficiará de pantalla.
3. Corten unas tarjetas de cartón cuyo tamaño sea mayor que la ventana y hagan una pequeña perforación en sus centros.

4. Fijen una de las tarjetas de cartón en la ventana que quedó libre.

5. Terminados estos ajustes, tapen la caja.

6. Prendan la vela y colóquenla delante de la tarjeta perforada.

7. Observen sobre la pantalla la imagen de la llama de la vela encendida.

Luego de realizado el experimento, analicen las siguientes cuestiones.

1. ¿Qué puede suceder con la imagen si se aleja o se acerca el cartón a la pantalla?
2. Elaboren un informe de las condiciones en que se desarrolló el experimento y de sus resultados.
3. ¿Qué sucederá si se repite el experimento con tarjetas cuyas perforaciones sean progresivamente más grandes? Discutan y escriban sus conclusiones.
4. Perforen otras dos tarjetas intentando que los agujeros sean cada vez mayores y traten de

confrontar las observaciones con sus conclusiones del punto anterior.

5. Si las perforaciones fueran de otra forma, por ejemplo triangulares o cuadradas, ¿se obtendrían imágenes circulares, o manchas de luz con estas formas? Discutan y anoten sus conclusiones.

6. Realicen cortes con distintas formas en algunas tarjetas y comprueben la validez de sus conclusiones anteriores.

7. Expliquen lo observado utilizando el modelo de la óptica geométrica.

8. Discutan las posibilidades de esta técnica para obtener imágenes del disco solar. Escriban cuáles serían los ajustes al diseño experimental que podría utilizarse para este fin y cuáles serían las ventajas y desventajas de la observación del Sol por este método.



La reflexión de la luz

Las leyes de la reflexión fueron enunciadas, casi en su forma actual, en el siglo XVII por el físico **Al-Haitham**, (965-1039) conocido en occidente como Alhazen. Hizo importantes adelantos en la óptica de lentes y de espejos. Realizó también las primeras experiencias de la dispersión de la luz en sus colores. Fabricó lentes con vidrios y analizó, con recipientes esféricos de vidrio llenos de agua, la refracción de los rayos en un medio transparente. Fue el primero en describir exactamente las partes del ojo y dar una explicación científica del proceso de la visión. Contradiendo la teoría de Tolomeo y de Euclides, quienes sostenían que el ojo emite los rayos visuales a los objetos, él consideró que son los rayos luminosos los que van de los objetos al ojo. Sus experimentos se aproximaron mucho al descubrimiento de las propiedades ópticas de las lentes. Construyó espejos parabólicos como los que ahora se usan en los modernos telescopios y estudió sus propiedades de enfoque.

Solo es posible ver los objetos si es que la luz proveniente de alguna fuente se refleja en su superficie y llega hasta los ojos. Se llama **reflexión** al fenómeno por el cual la onda electromagnética, al llegar a una superficie que separa dos medios, como la superficie de un vidrio que lo separa del aire, vuelve a aquél por el que viajaba.

Este fenómeno puede ser explicado, siguiendo el modelo geométrico, por dos leyes sencillas.

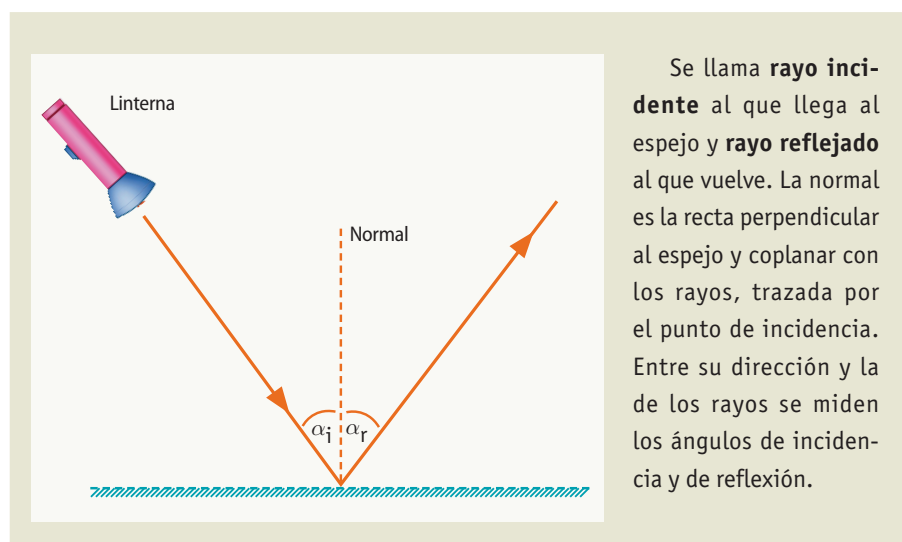
Primera ley de la Reflexión

El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en un mismo plano.

Segunda ley de la Reflexión

El ángulo de incidencia (α_i) es igual al ángulo de reflexión (α_r), es decir,

$$\alpha_i = \alpha_r$$



Es muy simple probar que esta ley es, en realidad una consecuencia del principio de Herón y de Fermat del tiempo mínimo. Dicho de otra manera, cualquier otro camino distinto del enunciado por las leyes de la reflexión, resulta más largo.

Normalmente, los cuerpos reflejan la luz que reciben en muy variadas direcciones; esto explica por qué se pueden observar desde ángulos tan variados. Esta clase de reflexión se conoce con el nombre de **reflexión difusa** o, simplemente, difusión de la luz. Su explicación se encuentra en que la superficie de los cuerpos es frecuentemente muy irregular. Observadas en detalle, con un instrumento de aumento, por ejemplo, muestran muchas caras orientadas al azar.

La reflexión que se realiza en los espejos se llama **especular**. Para que un objeto se transforme en espejo hay que lograr alisar la superficie, lo que se consigue por ejemplo con la técnica de pulido.

Comprobación experimental de las leyes de la reflexión

Para comprobar las leyes de la reflexión, es posible utilizar un diseño experimental que consta de una superficie reflectora (un espejo) y una fuente de luz a partir de la cual sea posible aislar un rayo. Es un modelo físico, aunque dentro de ciertos límites la luz que emerge de un puntero láser puede considerarse un rayo. Es necesario recordar que la radiación láser no debe incidir de ninguna manera directamente sobre los ojos. En esta experiencia no es necesario hacerlo y, además, se recomienda utilizar la luz láser el mínimo tiempo posible.

Materiales

Un espejo plano. Un puntero láser. Talco o polvo de tiza. Reglas, transportador, papel y lápiz. Varios pedazos de tirantes o tacos de madera que tengan un par de caras en escuadra.

Procedimiento

1. Fijen el plano del espejo en una orientación perpendicular al plano de la hoja de papel que se ubica sobre la mesa utilizando los tacos de madera.

2. Marquen la recta que corresponde a la intersección del plano del espejo y del papel. (Sugerencia: conviene ubicar el espejo en el medio de la hoja, y dibujar sobre una de sus mitades.)

3. Ubiquen el puntero láser sobre otro de los tacos o sobre una regla, para poder mover su orientación a voluntad y marcar de manera sencilla sobre el papel la dirección en la que incide el rayo láser.

4. Discutan cuál es el camino que recorre la luz, teniendo en cuenta el principio del tiempo mínimo para



lograr su reflejo en algún lugar en particular. Comprueben luego su predicción prendiendo el láser.

5. Espolvoreen en forma cuidadosa el talco o el polvo de tiza sobre la hoja. Realicen el experimento nuevamente y dibujen la dirección del haz de luz láser.

6. Ubiquen una regla en la misma orientación que observan el rayo reflejado. Recuerden apagar el láser apenas logren la ubicación correcta.

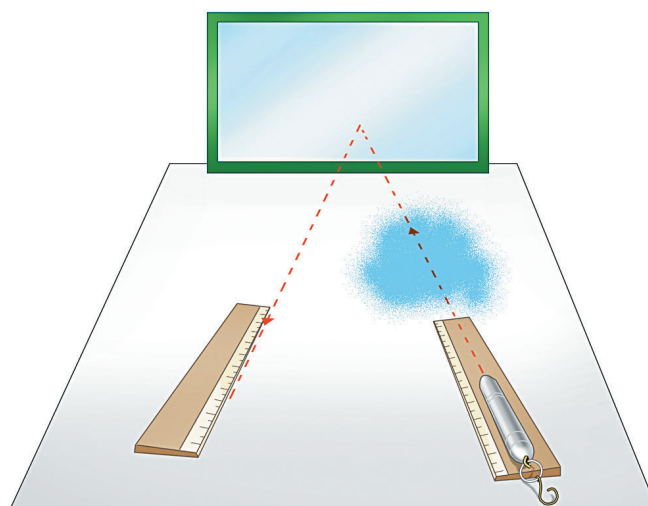
7. Marquen con el lápiz esta dirección y la de incidencia.

8. Dibujen, para cada camino óptico, la normal correspondiente.

9. Midan los ángulos a fin de comprobar la validez de las leyes de la reflexión vistas.

10. Preparen un informe donde anoten las concordancias y desajustes eventuales entre lo esperado y lo hallado. Indiquen cuáles podrían ser las modificaciones que propondrían al diseño experimental para lograr una precisión mayor en esta comprobación.

11. Propongan un camino alternativo al marcado y escriban por qué el que sigue la luz puede ser considerado el mínimo.



La refracción de la luz

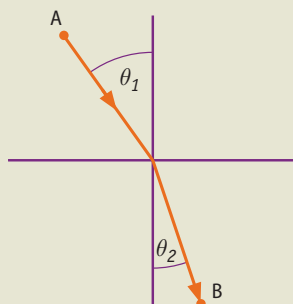
● Cuando un rayo de luz rebota en una superficie que separa dos medios transparentes se dice que el rayo se **refleja**. En cambio, cuando el rayo la atraviesa, se dice que se **refracta**. Estos fenómenos se conocen como reflexión y refracción.



Cuando un lápiz se sumerge en un recipiente con agua, aparenta estar quebrado si se lo mira desde arriba. Este efecto en su imagen se produce por el cambio de dirección de la luz que se refracta al pasar del agua al aire.

Cuando un rayo de luz llega a una superficie que separa dos medios transparentes diferentes, parte de él se refleja y parte logra atravesarlo, es decir, se **refracta**. Excepto en el caso particular en el que incide en forma perpendicular a la superficie de separación entre los medios, el rayo refractado tiene una dirección diferente de la del rayo incidente.

La dirección del rayo incidente y la del refractado determinan con la dirección normal ángulos de incidencia y de refracción.



Puede observarse en el dibujo que la luz no sigue el camino más corto entre dos puntos, como A y B, si ambos están en distintos medios. Sin embargo, es posible demostrar que, debido a las distintas velocidades de la luz en cada uno de ellos, se cumple que el tiempo mínimo en recorrer el camino entre A y B es el indicado en el dibujo.

La luz efectivamente tiene velocidades diferentes según los medios transparentes que atraviesa. Este hecho permite asignarles a los distintos materiales un valor llamado **índice de refracción** definido como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la que tiene en el material:

$$n = \frac{c}{v}$$

En base a este índice, puede plantearse una relación sencilla conocida como **Ley de Snell**. Si se miden el ángulo de incidencia θ_1 y el de refracción θ_2 , en base a la recta normal dibujada en el mismo plano que el camino luminoso, el enunciado de esta ley es:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

El índice de refracción puede variar según la longitud de onda de la luz. Por ejemplo, de las longitudes de onda visibles, la roja es la que menos se desvía y la violeta la que más lo hace. Por eso, usando un prisma, se puede separar el espectro de la luz blanca.

Algunos índices de refracción para luz amarilla

Medio	Índice de refracción
Agua	1,33
Alcohol etílico	1,36
Aire (CNPT)	1,0003
Cuarzo fundido	1,46

Medio	Índice de refracción
Vidrio (según la clase)	1,5 y 1,9
Cloruro de sodio	1,53
Polietileno	1,50 a 1,54
Diamante	2,42

Aplicaciones de la Ley de Snell

¿Cuánto se desvía un rayo de luz que incide desde el aire sobre el agua?

Si se supone que el ángulo de incidencia es de 30° , como el índice de refracción del agua es $n_{\text{agua}} = 1,33$, aplicando la ley de Snell, se obtiene:

$$n_{\text{agua}} \cdot \text{sen } \theta_{\text{agua}} = n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \theta_{\text{aire}}$$

Luego:

$$\text{sen } \theta_{\text{agua}} = \frac{n_{\text{aire}} \cdot \text{sen } \theta_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{1 \cdot \text{sen } 30^\circ}{1,33} = 0,375$$

El valor obtenido corresponde a un ángulo de desviación de aproximadamente 22° .



El juego de los dardos luminosos

El objetivo de esta actividad es la comprobación experimental de las leyes de la refracción y de la reflexión. La intención es lograr la mayor precisión posible en las predicciones que se hagan sobre la orientación del rayo emergente, el cual se hará visible por su incidencia sobre una hoja de papel. Sobre ella estará marcada una posición a priori, considerada centro de puntería. Como en el juego de dardos, el puntaje más alto corresponde al centro y baja a medida que la incidencia del rayo se aleja de él. Se utilizará, como en la experiencia anterior, el haz de un puntero láser como una aproximación a la idea geométrica de rayo de luz.

Materiales

Un puntero láser. Un recipiente rectangular. Un espejo plano. Agua. Tacos de madera. Lápiz y papel.

Procedimiento

a. Construcción del juego

1. Ubiquen en el fondo del recipiente el espejo plano, que es el que reflejará la luz que impactará sobre el blanco.

2. En uno de los laterales peguen el puntero. Por ejemplo, es posible fijarlo sobre una regla y sostenerla sobre una

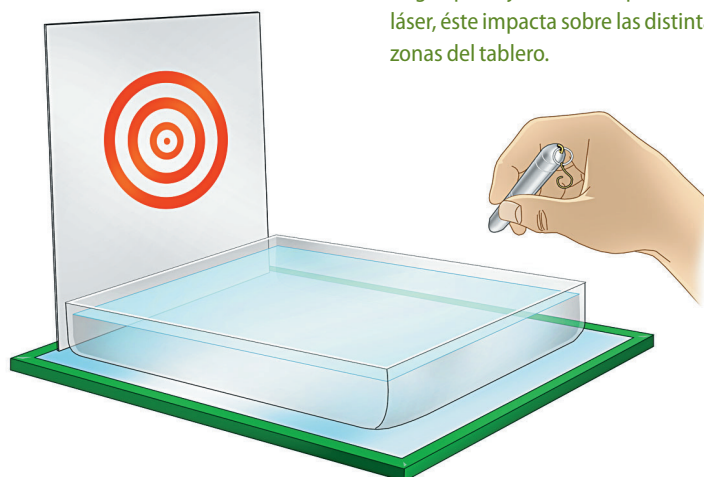
de las paredes laterales con masilla o de alguna otra manera que permita ajustes a la orientación del haz.

3. Ubiquen el tablero sobre el otro lateral. La escala de construcción de este tablero debe tener relación con la del recipiente con el que se va a trabajar. La habilidad de quien dispara se pondrá a prueba ubicando, a distintas alturas cada vez, el centro de puntería. Es importante discutir en el grupo y acordar estas condiciones experimentales así como la manera en que, en cada tiro, la ubicación del tablero podría considerarse fija. Se sugiere establecer con precisión el tiempo máximo con que se cuenta para realizar los ajustes previos al

disparo del láser y el número de tiros que componen una partida, o si ganará el primero que alcance un valor tope de puntos.

b. Desarrollo del juego

Armen grupos de entre 4 y 6 alumnos. En cada tiro se modifica la posición del láser y del blanco. Realicen todas las mediciones y cálculos que consideren necesarios a priori, es decir, sin encender el puntero, para intentar predecir con la mayor precisión posible la incidencia del haz sobre el papel, después de reflejarse y refractarse. Estas mediciones están destinadas a determinar la ubicación que consideren adecuada para el puntero a fin de lograr la máxima puntería, según la ubicación del blanco. Se asigna puntaje cuando, al prender el láser, éste impacta sobre las distintas zonas del tablero.



Imágenes reales y virtuales

Los diferentes instrumentos ópticos distinguen dos tipos de imágenes: las imágenes reales y las imágenes virtuales.

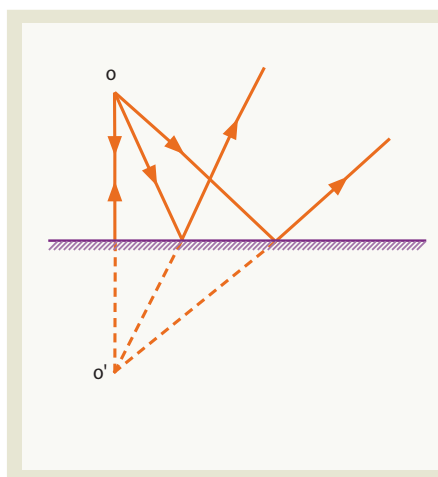
Las **imágenes reales** son aquellas que se forman en el sitio donde verdaderamente convergen los rayos. Es posible captarlas sobre una pantalla, una película fotográfica o verlas directamente dirigiendo la mirada a ese punto.

Las **imágenes virtuales**, en cambio, son las que se forman por la apariencia de convergencia de los rayos luminosos y no por su convergencia real en un punto como en el caso anterior. Por ejemplo, son imágenes virtuales las que se forman en los espejos planos: se ven dentro del espejo o detrás de él. En realidad no están allí, solo lo aparentan.

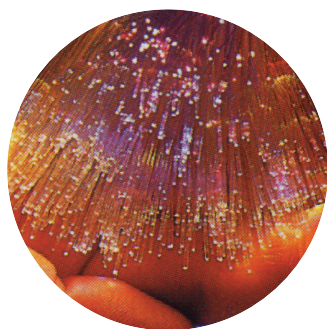
Una explicación para las imágenes virtuales, desde el modelo de la óptica geométrica, es que aquellos rayos provenientes de un objeto, reflejados o refractados por un sistema óptico, tienen direcciones divergentes y no convergentes. Por lo tanto la energía no se concentra en un punto como en las imágenes reales. Son las prolongaciones de los rayos reflejados o refractados las que se juntan para formar las imágenes virtuales.



Noche blanca, Leonardo Erlich (París, 2004). La gente se acuesta sobre un gigantesca reproducción fotográfica de un edificio, extendida sobre el piso. Un enorme espejo a 45° verticaliza la imagen y el público parece colgar de la fachada.



Las prolongaciones de los rayos reflejados convergen en un punto donde se forma la imagen virtual. Es posible comprobar la posición de la imagen a partir de la prolongación de las direcciones de un par de rayos reflejados, para una misma ubicación del láser, repitiendo la actividad experimental de la página 281.



La fibra óptica está compuesta por un filamento de material transparente cubierto por otro material de índice de refracción menor. La luz que entra y que incide en las paredes con ángulos muy rasantes, mayores que el ángulo límite, se refleja en su interior. Va sufriendo de este modo, múltiples reflexiones totales que lo hacen avanzar en un camino quebrado, como rebotando por el interior de la fibra.

Reflexión total

En algunas circunstancias, medios transparentes como el agua o el aire reflejan totalmente la luz como si fueran espejos. Este fenómeno se conoce como **reflexión total**.

Por ejemplo, si se llena un vaso de vidrio transparente con agua y se observa desde cierto ángulo, es posible notar que la superficie interior de agua refleja las imágenes como si fuera un espejo.

La reflexión total solo puede darse cuando la luz llega a un medio con menor índice de refracción que aquel en el que se estaba propagando.

El índice de refracción está relacionado con la velocidad relativa de propagación de la luz en el medio, respecto de la que tiene en el vacío. Cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor es este alejamiento. Por lo tanto, se puede pensar que, para algún valor límite, este ángulo de refracción es el máximo posible, es decir un alejamiento de 90° respecto de la normal. Superado este valor límite, el rayo se reflejará en lugar de refractarse. En este caso, la superficie transparente se comporta como un espejo.

Espejos

Se llama **espejo** a todo cuerpo que tiene una superficie pulida capaz de reflejar prácticamente toda la luz que le llega.

Los espejos pueden clasificarse en planos o esféricos, según lo sea la superficie pulida que refleja la luz. Estos últimos, a su vez, pueden ser cóncavos o convexos, según qué cara del casquete esférico esté pulida.

Los **espejos planos** son los más comunes. Su frecuente uso se debe a que mantienen una estricta simetría con el cuerpo que reflejan. En otras palabras, no deforman la imagen, que es virtual y no puede ser captada por una pantalla, ya que la luz reflejada en ellos siempre diverge.

Los **espejos esféricos** son también bastante conocidos. Los cóncavos son usados normalmente como espejos de aumento y los convexos son los utilizados, por ejemplo, para ampliar el campo visual en los cruces de esquinas.

En las proximidades de los espejos esféricos existe un punto llamado **foco**. En el caso de que sea cóncavo, es donde convergen los rayos reflejados que incidieron sobre un espejo en dirección paralela a su eje. Si es convexo, éste es el punto respecto del cual convergen las prolongaciones de los rayos que, habiendo incidido en forma paralela, se reflejan en forma divergente. Geométricamente, este punto corresponde a la mitad del radio de curvatura, longitud que se conoce como **distancia focal**.

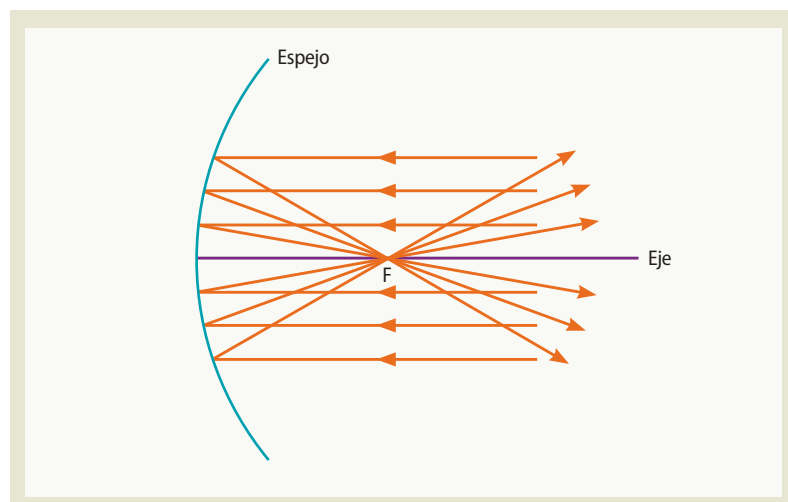
El eje principal de un espejo esférico es la dirección que coincide con el diámetro. Las superficies pulidas aptas para ser un espejo esférico deben poseer una pequeña abertura (de alrededor de 5°) que es el ángulo que forma el eje y uno de sus radios extremos y, además, los rayos incidentes de los objetos cuya imagen se desee obtener deben estar cercanos al eje.

Las leyes de la reflexión aplicadas a espejos esféricos permiten la elaboración de unas relaciones matemáticas sencillas. A partir de ellas es posible calcular el lugar en que se forma la imagen, real o virtual, y su tamaño.

1. Si el rayo incidente o su prolongación pasan por el foco, se refleja en forma paralela al eje.

2. Si el rayo incide paralelo al eje, se refleja pasando, él o su prolongación, por el foco.

3. Si el rayo incide pasando por el centro de curvatura que es el centro de la esfera a la que pertenece el casquete esférico, se refleja sobre sí mismo.



El callejón del Gato

En el siglo XV, Juan Álvarez Gato, poeta madrileño, inauguró un lugar en el cual la gente podía ir a divertirse mirando sus imágenes deformadas por dos espejos, uno cóncavo y otro convexo. Su fama llegó hasta nuestros días a partir de su mención, por parte de algunos escritores que lo vinculan con la técnica que se conoce como *esperpento*, sinónimo de mamarracho, la cual consiste en la deformación sistemática de la realidad como recurso literario.

Si se denomina x a la coordenada del objeto, f a la distancia focal y x' a la ubicación de la imagen, se obtiene la ecuación de los espejos esféricos:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Una lámina plana de vidrio puede considerarse como una lente de curvatura cero, lo que implica que sus puntos focales están en el infinito.

En esta ecuación, las posiciones del lado del espejo en que incide la luz son positivas, siendo las otras negativas. Por lo tanto f en un espejo convexo es un valor negativo.

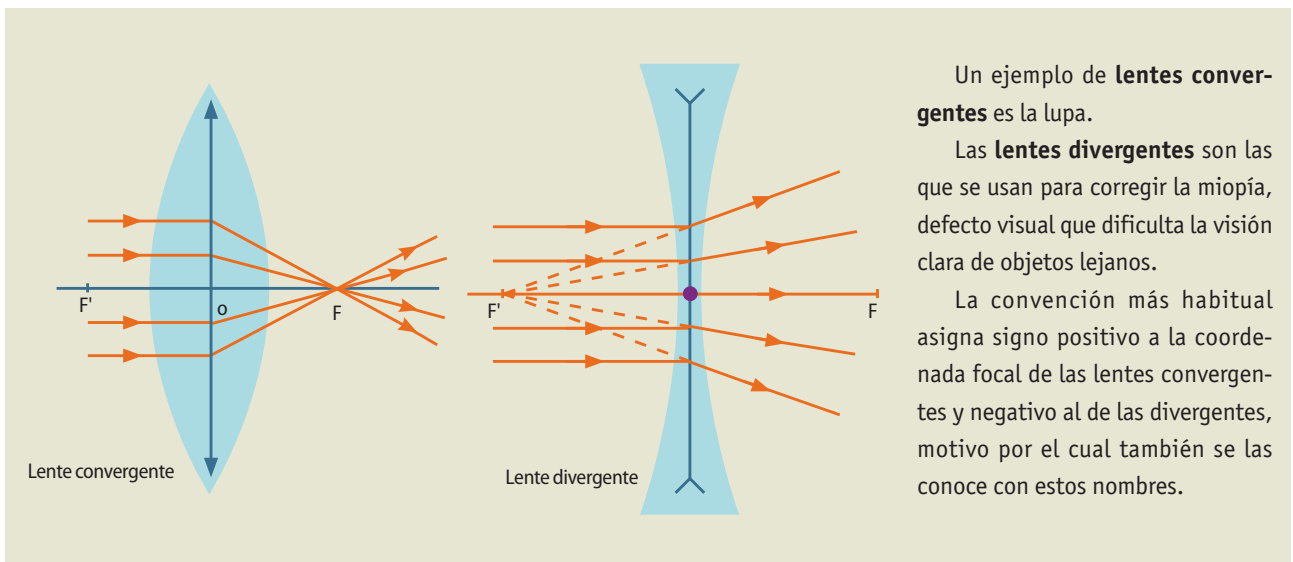
Con los espejos esféricos se pueden obtener imágenes aumentadas o disminuidas del objeto, directas o invertidas. El aumento lateral y la orientación de su imagen se obtiene por la aplicación de la ecuación para el aumento lateral en espejos esféricos, en la cual la altura del objeto es y , siendo y' la simbolización de la altura de la imagen.

$$-\frac{y'}{y} = \frac{x}{x'}$$

Imágenes obtenidas por lentes

Una **lente** es todo medio transparente limitado por dos caras de las cuales al menos una es curva. Esta condición geométrica permite plantear, como en el caso de los espejos, una dirección llamada eje de la lente. En las lentes delgadas, es decir aquellas en las cuales su espesor es despreciable respecto de la distancia a la que se encuentra el objeto, el punto en el cual el eje toca a la lente se conoce como **centro**.

Las lentes se clasifican en convergentes y divergentes, según si la luz que incide paralela al eje converge en un punto llamado foco o diverja de él.



Unas reglas sencillas permiten la obtención gráfica de la ubicación y el tamaño de la imagen obtenida por una lente. Se enuncian para tres rayos principales.

1. Si la dirección de incidencia de la luz es paralela al eje, se refracta pasando por el foco.
2. Si la dirección de incidencia de la luz es tal que el rayo o su prolongación pasa por el foco, se refracta en una dirección paralela al eje.
3. Si la dirección de incidencia pasa por el centro de la lente, el rayo no se desvía.

Como en los espejos esféricos, para las lentes es posible obtener, mediante unas relaciones matemáticas sencillas, la ubicación x' , de la imagen partiendo de la ubicación del objeto que la forma, designada como x , y de la distancia focal de la lente f por la ecuación de las lentes.

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Para el tamaño de la imagen y' , comparada con de la del objeto y , la ecuación es la siguiente:

$$-\frac{x}{x'} = \frac{y'}{y}$$

Se denomina potencia de una lente a la medida del grado de desviación que produce en los rayos de luz, la que aumenta según disminuye la distancia focal. Por esto es que se define:

$$P = \frac{1}{f}$$

y se mide en m^{-1} , que se denomina **dioptría**.

Aplicaciones al cálculo de posición y tamaño de imágenes

1. El radio de un espejo esférico cóncavo es de 20 cm. A 30 cm de distancia desde el vértice y un poco sobre su eje principal se coloca una fuente luminosa puntual. ¿Dónde se encuentra su imagen? ¿Es real o virtual?

Se define para el eje del espejo la siguiente convención: las coordenadas x positivas son las que están del lado de su foco. Por lo tanto: $x = 30$ cm; $f = 10$ cm. Si se reemplaza en la ecuación de los espejos esféricos:

$$\frac{1}{30\text{cm}} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{10\text{cm}}$$

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{10\text{cm}} - \frac{1}{30\text{cm}} = \frac{3-1}{30\text{cm}} = \frac{1}{15\text{cm}}$$

Con lo cual $x' = 15$ cm. La imagen está ubicada sobre el eje, a 15 cm y es real.

2. Un objeto de 10 cm de altura se coloca a 40 cm de una lente convergente de distancia focal 20 cm. ¿Cuál es la ubicación de su imagen? ¿Es real o virtual? ¿Está aumentada o disminuida? ¿Está invertida?

Si se considera la ecuación de las lentes, donde, por ser la lente convergente, f es positiva.

$$\frac{1}{40\text{cm}} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{20\text{cm}}$$

Por lo tanto $\frac{1}{x'} = \frac{1}{20\text{cm}} - \frac{1}{40\text{cm}} = \frac{2-1}{40\text{cm}} = \frac{1}{40\text{cm}}$. Luego, $x' = 40$ cm y entonces la imagen está ubicada a 40 cm y es real.

Como en este caso con la expresión:

$$\frac{x}{x'} = -\frac{y'}{y} \text{ se obtiene } y = -y' \text{ para este caso particular.}$$

Por lo tanto la imagen real se forma en la misma ubicación del objeto, es del mismo tamaño y está invertida.

El cristalino del ojo es una lente convergente que puede cambiar su foco, capacidad que se llama acomodación.

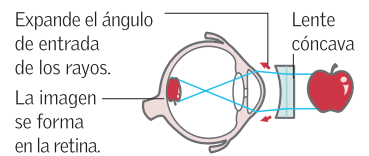
La miopía es un defecto que impide la visión correcta de objetos lejanos.

Se corrige con lentes divergentes.

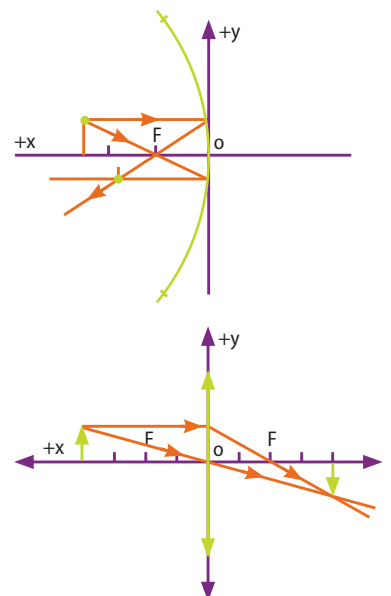
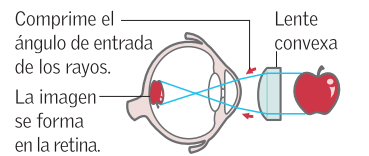
La hipermetropía es el defecto contrario, es decir que se forman imágenes borrosas de los objetos cercanos. Se corrige con lentes convergentes.

La presbicia es el defecto asociado a la pérdida de la capacidad de acomodación del cristalino; necesita para su corrección lentes convergentes para la visión cercana y divergentes para la de objetos lejanos.

Corrección con lentes cóncavas



Corrección con lentes convexas



Óptica física

Los fenómenos ópticos no pueden ser explicados en su totalidad a partir del modelo de rayos. Por ejemplo, las leyes de la refracción antes enunciadas suponen la utilización de un rayo de luz monocromático, ya que el índice de refracción también varía con la longitud de onda de la luz. El hecho de que la luz blanca se dispersa en los distintos colores del espectro cuando atraviesa las caras de un prisma no puede ser explicado por las leyes de refracción de la óptica geométrica. Tampoco puede aplicarse esta teoría cuando los fenómenos luminosos incluyen objetos de un tamaño similar al de la longitud de onda de la zona visible del espectro, que es de 0,4 a 0,7 μm . Es necesario, por lo tanto, abandonar este modelo basado en el rayo luminoso, para considerar el comportamiento ondulatorio de la luz.

Sin embargo hay fenómenos, como el efecto fotoeléctrico, que no pueden ser explicados mediante el modelo ondulatorio. En esos casos se utiliza un modelo basado en el concepto de **fotón**. Los fotones son porciones de energía o corpúsculos de luz que permiten explicar por qué una radiación de cierto color, al incidir sobre un metal, logra liberar algunos electrones.

Desde cualquiera de estos modelos, el de rayos, ondas o fotones, puede afirmarse que la luz transporta información. Por eso, en principio, puede intentarse la decodificación de la luz para obtener información acerca de aquello que la produce o con lo que interactúa.

Interferencia

Cuando en una cámara oscura la abertura es demasiado pequeña, se observa la formación de zonas alternadas de luz y de sombra. No es posible explicar este hecho por el modelo de rayos. Es la oportunidad del modelo ondulatorio.

Thomas Young (1773-1829) demostró por primera vez el fenómeno de la interferencia óptica. Su experimento fue muy importante para dar a la teoría ondulatoria de la luz una base experimental firme. Por entonces, ésta se encontraba en pugna con la teoría corpuscular, que había sido defendida por Newton.

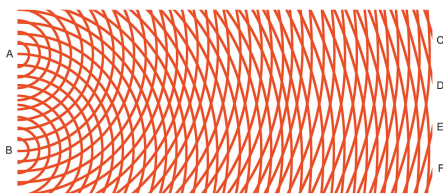
El experimento de Young consiste en hacer pasar luz monocromática, es decir de una sola longitud de onda, por un par de orificios muy pequeños y próximos entre sí. Cuando uno de ellos está tapado, es posible observar una mancha circular sobre una pantalla ubicada a suficiente distancia. Cuando ambos orificios están destapados, sobre la pantalla aparecen bandas claras y oscuras, llamadas **bandas de interferencia**.

La explicación de este fenómeno, dentro del modelo ondulatorio, se basa en el desfase constante que se produce en la luz, inicialmente en fase, al emerger por los dos orificios. Las ondas llegan a la pantalla por caminos diferentes y por lo tanto una de ellas presenta un retraso respecto de la otra. Las manchas de luz suponen una interferencia constructiva y las oscuras, una destructiva.

La condición para que en un punto y de la pantalla, ubicado a la distancia x haya interferencia constructiva es:

$$y = \frac{n \cdot x \cdot \lambda}{a}$$

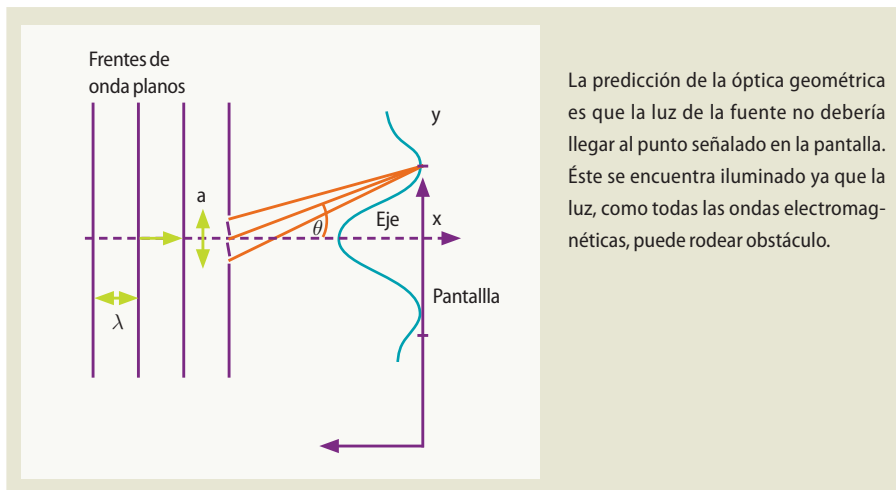
donde λ es la longitud de onda de la luz, a la distancia entre los orificios y n un número entero.



Este es el dibujo original de Thomas Young. Si se coloca el ojo cerca del borde izquierdo, al ras de la hoja, es posible tener la sensación de bandas de luz y de sombra.

Difracción

Cuando la luz encuentra en su camino orificios muy pequeños u obstáculos muy delgados, tanto como el orden de magnitud de su longitud de onda, es posible observar efectos de difracción. Como se explicó en el capítulo 12, la difracción es el hecho por el cual las ondas pueden rodear, en ciertas condiciones, obstáculos que se interpongan en su camino. El efecto observado sobre una pantalla es zonas claras y oscuras. Si a es el diámetro de un orificio, y λ es la longitud de onda de la luz, entonces la relación debe ser un número pequeño. Si es suficientemente grande, este efecto puede pasarse por alto.



La difracción fue descubierta por Francesco Grimaldi (1618-1663) quien al hacer incidir luz de una pequeña fuente sobre un cabello, observó que en lugar de una sombra se formaban varias, separadas por zonas iluminadas.

En vez de utilizar una sola abertura, o dos como en el experimento de Young, para producir difracciones, es posible utilizar un dispositivo conocido como **red de difracción**. Las primeras redes eran surcos muy finos trazados en un vidrio. En la actualidad se cuenta con redes fabricadas con procedimientos y técnicas muy avanzados, como la tecnología láser utilizada en el grabado de discos compactos.

Una aplicación de la difracción es la técnica que se conoce como **espectrografía**. Se basa en que, al iluminar una red de difracción con una luz monocromática, se forma un máximo central y algunos laterales. Si se utiliza luz de otra longitud de onda, el máximo central se mantiene, pero los secundarios están corridos respecto de la ubicación anterior. Por lo tanto, si se ilumina una red con una luz que tiene mezcla de varias longitudes de onda, a partir del máximo central se forma una separación que constituye el espectro de la luz incidente.

Mediante una red, es posible separar el espectro de un determinado tipo de luz. Los distintos elementos de la tabla periódica emiten, dadas algunas condiciones, luz en una determinada longitud de onda. Por lo tanto, el análisis espectral de la luz puede dar información acerca de la composición química de algún objeto. Esta técnica puede ser aplicada para estudiar la composición química de la atmósfera de un lejano planeta.

Los efectos de la difracción son observables en casos más cotidianos como, por ejemplo, en los brillantes colores que devuelve un disco compacto. Los pequeños hoyitos de su superficie actúan como una red de difracción, separando el espectro de la luz blanca.

Se pueden observar efectos de difracción al hacer pasar la luz de una fuente luminosa lejana, como por ejemplo el Sol, a través de una pequeña franja de separación entre los dedos.

Los colores

¿Cuánto hay de objetivo y cuánto de subjetivo en el color asignado a las cosas?

Si bien cada color puede relacionarse objetivamente con una longitud de onda particular en la zona visible del espectro electromagnético, la percepción del color corresponde a la sensación que cada una de esas radiaciones produce en el sistema visual. Es posible afirmar que un objeto es rojo para todo aquel que pueda percibir el rojo.

En la sensación del color influye el tipo de longitudes de onda presentes en la radiación que ingresa al ojo y la intensidad relativa de cada una de ellas. Esta radiación trae hasta el ojo la información del color del objeto, tanto sea que éste la emita o la refleje. En este último caso, la luz reflejada ha sido modificada por el objeto, y por lo tanto de alguna

manera trae información de su superficie.

Si se ilumina un objeto con luz blanca, que cubre todas las longitudes de onda visibles, la luz reflejada por su superficie traerá información del objeto por cuanto, según de cuál radiación se trate, será absorbida o reflejada en mayor o menor medida. Si un objeto se ve rojo, es porque la luz que refleja es en mayor medida de ese color, mientras que los otros son absorbidos. Por esto, si a este objeto se lo ilumina con luz de color azul, por ejemplo, se lo verá negro, ya que absorberá por completo la radiación sin reflejar nada.

Los objetos negros son aquellos que absorben todas las radiaciones presentes en el espectro de la luz blanca. Los blancos son

los que devuelven la luz blanca casi en forma completa, sin absorber ningún color.

Este mismo principio se aplica a los colores observados en algunos objetos transparentes, como vidrios coloreados. El color observado es, simplemente, el que corresponde a las longitudes de onda que no han sido absorbidas. Por el mismo motivo, un cristal coloreado podría verse negro, si se lo ilumina solo con luz de las longitudes de onda que absorbe, ya que no transmitiría nada.

Así como la combinación de todas las longitudes de onda de la luz visible dan el color blanco, también es posible producir este color a partir de la combinación de luces solo roja, verde y azul, de iguales intensidades.

La teoría de la descomposición fue utilizada por los pintores impresionistas, aunque fundamentalmente por en el movimiento conocido como puntillismo. En él los artistas producen una mezcla óptica precisa a partir de diminutas pinceladas de colores complementarios. Este hecho puede apreciarse en el cuadro *Un domingo por la tarde en Grande de Jatte*, de George Pierre Seurat.



Se denomina **cuatricotomía** a la impresión a tres colores sobre papel con tintas o colorantes. Esta impresión utiliza los colores: magenta (mezcla artificial que está entre el rojo y el violeta), cian, que es un azul algo verdoso, amarillo y el negro, que no es un color sino su ausencia.



La explicación de este fenómeno radica en las características de la visión humana. En la retina del ojo normal hay células sensibles a tres colores: azul, verde y rojo. Cada uno está relacionado con tres sectores del espectro: las longitudes de onda más largas, las medias y las más cortas. Las primeras dan la sensación de rojo, las que le siguen dan el verde y las últimas corresponden al azul. Es posible conseguir cualquier color superponiendo luz de estos tres.

Se llaman complementarios a dos colores que al superponerse se ven blancos. A partir de la figura anterior, puede verse claramente que:

rojo + verde = amarillo	
rojo + azul = magenta	
azul + verde = cian	

Este hecho se conoce como mezcla de colores por adición. Las pantallas de los televisores utilizan este efecto iluminando con distintas intensidades puntos en la pantalla que combinan estos tres colores, que al ser mezclados por el ojo, dan las distintas sensaciones de color.

También existen mezclas sustractivas de colores. Si se mezclan témperas de color rojo y verde no se obtiene el color amarillo, sino más bien un tono marrón.

A partir de un conocimiento práctico de las mezclas de colores por sustracción es posible anticipar con bastante precisión el color resultante a partir de una mezcla de pinturas.

La explicación de las diferencias que presentan estas mezclas radica en el tipo de materiales que las componen. No es lo mismo mezclar luz que pinturas.

Los pigmentos de una pintura reflejan una gama de colores relativamente amplia, no solo un color. Por ejemplo, una pintura azul refleja principalmente el azul, aunque también parte de verde. Una pintura amarilla refleja el amarillo, aunque también algo de verde. Entonces, si se mezclan una pintura azul con una amarilla, se la verá verde, que es el color que ambas reflejan y no absorben.

Un conocimiento básico sobre pintura comienza por establecer los colores llamados primarios: el rojo, el amarillo y el azul. Con ellos se pueden formar cualquiera de los otros colores. Los sistemas de impresión trabajan con tres colores de tinta por sustracción que son: el magenta, el amarillo y el cian.

Los colores del cielo

¿Por qué el cielo es azul? ¿Por qué los atardeceres son rojos?

La primera pregunta se responde a partir de un fenómeno conocido como dispersión de la luz blanca. La luz blanca del Sol es dispersada por las moléculas que componen la atmósfera. La capa superior absorbe la mayor parte de la luz ultravioleta y solo una pequeña fracción de ella sigue hacia la superficie. De las frecuencias visibles, el violeta y el azul son los colores que más se dispersan. El ojo humano no es tan sensible al violeta como al azul, por eso el cielo se ve de este color. La luz que menos se dispersa es el rojo. Por eso no se observa, salvo cuando el Sol está muy bajo sobre el horizonte. Cuando amanece o anochece, el camino que debe recorrer la luz a través de la atmósfera es más largo, por lo que, la luz azul resulta casi totalmente dispersada y no alcanza las capas inferiores. Esto permite observar unos hermosos amaneceres y atardeceres rojos.



En las pantallas de un televisor las imágenes se construyen iluminando distintos puntos en filas sucesivas. Existe un tamaño mínimo para este elemento del dibujo de las imágenes, que se llama **pixel**. El número de pixels verticales y horizontales debe ser aproximadamente igual, ya que el ojo es sensible a la información en ambas direcciones. Las imágenes de televisión se forman por aproximadamente 140 000 pixels. Para crear la sensación de movimiento es necesario reproducir 25 imágenes por segundo, lo cual supone una tasa de transferencia de información de 3,5 millones de pixels por segundo. En una película cinematográfica esta tasa es del orden de los 1000 millones por segundo

Analizar impresiones de color



Materiales

Una lupa de 20 o más aumentos (menos de 5 cm de distancia focal). El cuadro de la página 290 u otro que aplique el puntillismo.

Procedimiento

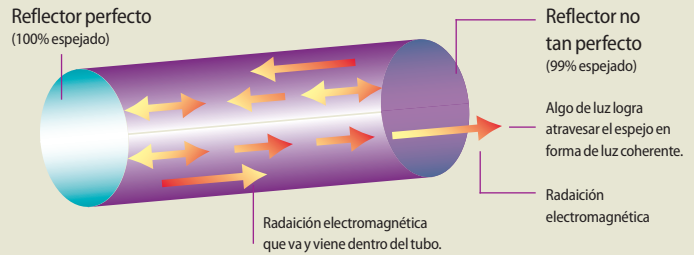
1. Con buena iluminación observen con la lupa regiones del cuadro en la que haya zonas oscuras, claras, de un solo color, blancas o negras.
2. Tomen nota de lo observado y compárenlas.
3. Propongan una explicación de las diferencias observadas.

Láser

ALGUNA VEZ SE HA DICHO QUE EL LÁSER FUE UN INVENTO QUE CONSTITUYÓ UNA SOLUCIÓN EN BUSCA DE UN PROBLEMA.

Lo cierto es que hoy en día sus aplicaciones son tan amplias como quizás no se podría haber imaginado a partir de su invención.

Los principios de su funcionamiento se basan en un fenómeno que ocurre a escala microscópica: la emisión de radiación electromagnética por parte de los átomos de un material. Cualquier tipo de elemento químico tiene un espectro de emisión característico. Esta emisión puede ser espontánea o estimulada. Esta última representa una cierta tendencia de los átomos a emitir radiación en una frecuencia idéntica a la de algún otro átomo vecino. En cualquier emisión luminosa por parte de un material, están presentes los dos tipos de emisión, solo que la estimulada es normalmente muy débil. Entregando una buena cantidad de energía a los átomos de un



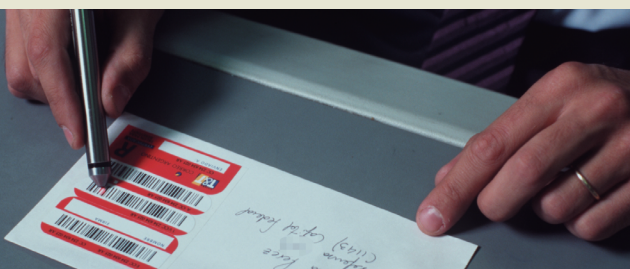
La función de los espejos en la emisión de un láser. La radiación encerrada en la cavidad produce la inversión de la población electrónica.

material, se logra colocar sus electrones en un nivel superior al llamado fundamental, que es el más probable. A esto se llama *inversión de población*.

Un **láser** es un dispositivo que produce prioritariamente el efecto de emisión estimulada y lo amplifica. El nombre deriva de la sigla que en inglés significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de la radiación por emisión estimulada). En realidad, la amplificación se logra por una oscilación del haz de luz obtenida por emisión estimulada, motivo por el cual el láser en algún momento pudo ser un *loser* (perdedor), nombre que seguramente no respetaría en nada su destino tan lleno de exitosas aplicaciones. El primer dispositivo de emisión estimulada amplificada se construyó en 1954 y lograba

radiar en microondas en lugar de luz visible, por lo que se lo llamó *máser*. El primer láser en funcionamiento fue construido por Theodore Maiman en 1960. Empleó un cristal de rubí, que es de color rojizo. Consiguió amplificar la luz haciéndola oscilar en espejos ubicados en sus extremos. En este modelo, uno de los espejos tiene una reflexión del ciento por ciento, mientras que la del otro es un poco menor. Superado cierto umbral, la radiación logra salir del oscilador y constituye la radiación conocida como láser. La radiación láser ha encontrado aplicación en múltiples ciencias y tecnologías. Su importancia procede de la alta intensidad de la luz emitida, el haz estrecho de poca divergencia, la gran pureza en la longitud de onda y su coherencia.

El lector del código de barras que traen los productos para su identificación se realiza mediante un láser.



Luego de la lectura del texto busquen diferentes aplicaciones que tienen los rayos láser en la actualidad.

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- La **Óptica** es la rama de la física que estudia los fenómenos asociados a la franja visible del espectro electromagnético y sus entornos próximos.
- Los cuerpos pueden clasificarse en **transparentes**, **translúcidos** y **opacos**, según su comportamiento frente a la incidencia de un determinado tipo de onda luminosa.
- A cada tipo de onda luminosa se asocia una **longitud de onda**, una **intensidad** y una **dirección** de propagación que sostiene la idea de rayo luminoso.
- La **velocidad de la luz en el vacío** vale aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s.
- La **óptica geométrica** se basa en la propagación rectilínea de la luz.
- La formación de **sombra** y **penumbra**, **fenómenos de reflexión en espejos**, **refracción en lentes** y **reflexión total** resultan sencillos de abordar desde el modelo de rayos luminosos.
- El **Principio de Fermat** establece el tiempo mínimo para el camino óptico y explica su reversibilidad.
- Los fenómenos de **interferencia** y **difracción** quedan explicados por el modelo ondulatorio de la luz.
- Los **colores** de un cuerpo no luminoso se explican a partir de la interacción de la radiación incidente con sus capas superficiales, por lo que la luz reflejada trae información del objeto.

Fórmulas

$$\alpha_{\text{incidencia}} = \alpha_{\text{reflexión}}$$

Reflexión

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

Refracción

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de los espejos esféricos

$$-\frac{y'}{y} = \frac{x}{x'}$$

Aumento lateral en espejos esféricos

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de las lentes

$$-\frac{x}{x'} = \frac{y'}{y}$$

Aumento lateral de las lentes

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. Respondan a las siguientes preguntas.

a. ¿Por qué si en un eclipse de Sol, su luz se filtrara por un pequeño orificio podría verse reproducida la imagen del disco solar cubierto parcialmente por la Luna?

b. ¿Cuál de los fenómenos analizados en este capítulo explica la visión del arco iris?

c. ¿Cómo es posible obtener luz amarilla a partir de la roja y la verde?

2. ¿De qué orden de magnitud es la distancia entre la Tierra y la Luna si un pulso láser disparado desde la Tierra tarda en retornar aproximadamente 3 segundos después de ser reflejado por la Luna?

3. ¿En qué sentido pueden considerarse muy antiguas las imágenes de la nebulosa Esquimal que se encuentra ubicada a aproximadamente 5000 años-luz de distancia del sistema solar? ¿Cuántos kilómetros habrá recorrido la luz proveniente de esa nebulosa antes de llegar a la Tierra?

4. ¿Cuál de los eclipses, los de Sol o los de Luna, son observables desde más lugares en la Tierra? ¿Por qué?

5. Delante de un espejo cóncavo se ubica un objeto luminoso de 2 cm de altura. ¿Cuál es el tamaño y la ubicación de su imagen si el objeto está a una distancia igual al doble del foco del espejo?

6. ¿Cómo cambiarían los resultados del problema anterior si el espejo fuera convexo en lugar de cóncavo?

7. Entre el rayo incidente y el reflejado por un espejo plano hay un ángulo de 50° . Dejando uno de los laterales del espejo fijo, se lo rota 30° respecto de su posición original, en un eje perpendicular a los rayos. ¿Cuánto vale el nuevo ángulo entre las direcciones de incidencia y de reflexión?

8. En un periscopio se cambia el espejo plano superior por otro esférico a fin de ampliar la zona observada, ¿se usará uno cóncavo, o uno convexo?

9. Una lámpara se encuentra situada a 9 metros de una pantalla sobre la que se forma su imagen real, invertida y del doble de su tamaño. ¿Qué tipo de lente se encuentra entre la lámpara y la pantalla? ¿Cuál es su distancia focal? ¿A qué distancia de la pantalla se encuentra la lente?

10. ¿Por qué si el agua es transparente las nubes de tormenta, formadas por gotas de agua relativamente grandes, se ven oscuras?

11. ¿A qué profundidad se ve el fondo de una pileta llena de agua si éste se encuentra en realidad a 5 metros del borde?

12. Un rayo luminoso incide desde el agua hacia el aire bajo un ángulo de incidencia de 30° . ¿Cuál será el ángulo de refracción?

13. Un objeto de 8 cm de alto se ubica a 20 cm de una lente convergente cuya distancia focal es de 4 cm.

a. Dibujen un diagrama con los rayos principales que muestre cómo se forma la imagen.

b. ¿A qué distancia se forma?

c. ¿Puede verse la imagen en una pantalla?

d. ¿Cuál es el tamaño de la imagen?

14. Un proyector tiene una lente de tipo convergente para proyectar diapositivas de 2 cm de altura. Si la proyección a 3 metros forma imágenes de 50 cm, ¿cuál es la ubicación de la lente respecto de la diapositiva y cuál es su potencia?

15. ¿Cuánto tiempo tarda un rayo de luz en atravesar perpendicularmente una lámina de vidrio de 1,5 de índice de refracción y de espesor igual a 2 cm?

16. ¿Cuando la luz pasa del agua al aire, cambia la frecuencia de la onda, o su velocidad?

17. En un día de sol, puede quemarse un papel utilizando una lupa. ¿Podría usarse un espejo cóncavo en lugar de la lupa para realizar el mismo experimento?

18. Cuando un rayo de luz incide perpendicularmente respecto de la superficie de separación de dos medios transparentes, no se desvía. ¿Significa eso que su velocidad de propagación no cambia?

19. Un objeto de 2 cm de altura se coloca a 10 cm de una lente divergente de 5 cm de distancia focal.

a. Dibujen un diagrama con los rayos principales que muestre cómo se forma la imagen.

b. ¿A qué distancia se forma?

c. ¿Puede verse la imagen en una pantalla?

d. ¿Cuál es el tamaño de la imagen?

20. A partir de los colores complementarios expliquen por qué son válidas las siguientes mezclas aditivas:

a. azul + amarillo = blanco

b. verde + magenta = blanco

c. rojo + cian = blanco

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- | | | |
|----|--|-----------------------|
| 1 | Como el Sol es una fuente de luz extensa, proyecta sobre la Tierra sombras y penumbras de todos los objetos que se interponen entre ambos. | <input type="radio"/> |
| 2 | La luz está formada por rayos luminosos. | <input type="radio"/> |
| 3 | La luz siempre sigue el camino más corto entre dos puntos. | <input type="radio"/> |
| 4 | Un espejo plano a veces deforma la imagen. | <input type="radio"/> |
| 5 | Cuando un rayo se refracta, en algunas condiciones se aleja y en otras se acerca a la normal. | <input type="radio"/> |
| 6 | Si pasa luz por una rendija rectangular, la mancha de luz que se formaría sobre una pantalla sería siempre rectangular. | <input type="radio"/> |
| 7 | Si ven a una persona debajo del agua, sin duda ella también podría verlos. | <input type="radio"/> |
| 8 | Un espejo plano invierte la izquierda y la derecha. | <input type="radio"/> |
| 9 | El índice de refracción se puede determinar con bastante aproximación si se mide respecto del aire en lugar del vacío. | <input type="radio"/> |
| 10 | El índice de refracción de una sustancia es siempre un número mayor o igual que 1. | <input type="radio"/> |
| 11 | El ángulo de incidencia y el de reflexión de la luz no son iguales en los espejos esféricos. | <input type="radio"/> |
| 12 | Una imagen real es una imagen del mismo tamaño que el objeto. | <input type="radio"/> |
| 13 | La imagen virtual es una imagen igual al objeto. | <input type="radio"/> |
| 14 | Los espejos esféricos no deforman la imagen, solo la agrandan o la achican. | <input type="radio"/> |
| 15 | Los espejos convexos siempre producen imágenes virtuales. | <input type="radio"/> |
| 16 | Una lupa es una lente convergente. | <input type="radio"/> |
| 17 | En el ojo se forman imágenes reales, invertidas y menores que el objeto. | <input type="radio"/> |
| 18 | Los fenómenos de difracción de la luz son difíciles de observar porque no ocurren muy a menudo. | <input type="radio"/> |
| 19 | Las bandas de interferencia pueden observarse pero no fotografiarse. | <input type="radio"/> |
| 20 | Un objeto amarillo se ve negro si lo iluminamos con luz amarilla. | <input type="radio"/> |