

OÍR Y VER

61 experimentos de acústica y óptica

Alejandro del Mazo Vivar · Santiago Velasco Maíllo · Rafael García Molina

edit.um
EDICIONES DE LA UNIVERSIDAD DE MURCIA

IUFFyM
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

f SéNeCa⁽⁺⁾
Agencia de Ciencia y Tecnología
Región de Murcia

OÍR Y VER

61 EXPERIMENTOS DE ACÚSTICA Y ÓPTICA

Alejandro del Mazo Vivar
Santiago Velasco Maíllo
Rafael García Molina

OÍR Y VER

61 EXPERIMENTOS DE ACÚSTICA Y ÓPTICA

Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas
de la Universidad de Salamanca

Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología
de la Región de Murcia

Universidad de Murcia

2016

1ª edición, 2016

Reservados todos los derechos. De acuerdo con la legislación vigente, y bajo las sanciones en ella previstas, queda totalmente prohibida la reproducción y/o transmisión parcial o total de este libro, por procedimientos mecánicos o electrónicos, incluyendo fotocopia, grabación magnética, óptica o cualesquiera otros procedimientos que la técnica permita o pueda permitir en el futuro, sin la expresa autorización por escrito de los propietarios del copyright.

Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia

© Alejandro del Mazo Vivar, Santiago Velasco Maillo y Rafael García
Molina, 2016
IUFFyM de la Universidad de Salamanca
Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia
Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones, 2016



ISBN: 978-84-84-16551-72-9

Depósito Legal MU 1349–2016

Impreso en España - Printed in Spain

Imprime: Servicio de Publicaciones. Universidad de Murcia
Campus Universitario de Espinardo • 30100 MURCIA

Índice

Prólogo

9



ONDAS

- | | |
|--|----|
| 1. Ondas en una cuerda | 13 |
| 2. Ondas longitudinales y transversales en un muelle | 15 |
| 3. Ondas estacionarias transversales en una cuerda | 17 |
| 4. Simulación de interferencias ondulatorias | 19 |



OÍR

- | | |
|------------------------------------|----|
| 5. Frecuencia de un sonido | 25 |
| 6. Timbre | 27 |
| 7. Excitación de armónicos | 29 |
| 8. Paraguas mensajeros | 31 |
| 9. Lente acústica | 33 |
| 10. Interferencias sonoras | 35 |
| 11. Sonido por un tubo | 39 |
| 12. Batidos | 41 |
| 13. Alfibajos de un diapasón | 43 |
| 14. Botellas sintonizadas | 45 |
| 15. Efecto Doppler | 47 |
| 16. Velocidad del sonido, con tubo | 49 |
| 17. Velocidad del sonido, soplando | 53 |
| 18. Música con una jeringa | 55 |
| 19. Botellas musicales | 59 |
| 20. Pajitas musicales | 61 |
| 21. Barra cantarina | 63 |
| 22. Guitarra con gomas | 65 |
| 23. Un oído artificial | 67 |
| 24. Audiometría casera | 69 |
| 25. Audición binaural | 71 |
| 26. Topófono engañoso | 73 |
| 27. Las campanadas | 75 |
| 28. Viendo el sonido | 77 |



VER

- | | |
|---|-----|
| 29. Cámara oscura | 81 |
| 30. Reflexión de la luz | 83 |
| 31. Refracción de la luz | 85 |
| 32. Imágenes con lentes | 89 |
| 33. Difracción de la luz | 91 |
| 34. Polarización de la luz | 93 |
| 35. Desviando colores con un prisma de agua | 97 |
| 36. Arco iris con un prisma de agua | 99 |
| 37. Arco iris con un CD | 101 |
| 38. Los colores del cielo | 103 |
| 39. Los colores básicos | 105 |
| 40. Síntesis aditiva de colores | 107 |
| 41. Los canales de una imagen | 109 |
| 42. Post-imagen | 113 |
| 43. Colores subjetivos | 115 |
| 44. Ilusión de Chevreul | 117 |
| 45. Canicas como lunas | 119 |
| 46. Profundidad de campo del ojo | 121 |
| 47. Agudeza visual | 123 |
| 48. Visión binocular | 127 |
| 49. Visión tridimensional | 129 |
| 50. Anaglifos | 133 |
| 51. Visión plana | 137 |
| 52. Falsas apariencias | 139 |
| 53. Objetos pseudotridimensionales | 143 |
| 54. Proyección de una imagen en el aire | 145 |
| 55. Visiones intermitentes I | 147 |
| 56. Visiones intermitentes II | 149 |
| 57. Taumátropo | 151 |
| 58. Mirando por un agujero | 153 |
| 59. La sombra del alfiler | 155 |
| 60. Un agujero en la mano | 157 |
| 61. Viendo el infrarrojo | 159 |



Bibliografía

163

Prólogo

Los animales (entre los cuales se encuentra el ser humano) emplean sensores fisiológicos para obtener información de su entorno, bien sea para conseguir pareja, buscar alimentos, detectar depredadores, etc. La diversidad de estímulos que pueden captar los seres vivos emerge con toda su riqueza en el mundo animal, donde podemos encontrar sensores eléctricos (anguila, ornitorrinco...), magnéticos (paloma, abeja...), térmicos (serpiente, tortuga...), químicos (perro, león, mosquito...), acústicos (ballena, gacela...), mecánicos (araña, cocodrilo...), ópticos (águila, gato...), por mencionar algunos. Varios de los sensores citados son compartidos, en mayor o menor medida, por diversos animales, aunque están más desarrollados en unos que en otros.

El repertorio sensorial de los seres humanos es más reducido, pues –canónicamente– solo disponemos de cinco: vista, oído, tacto, olfato y gusto. Además, no todos los sentidos son igual de eficientes, por lo que usamos unos más que otros. La vista es el más empleado, seguida del oído, seguramente porque ambos sentidos permiten la detección a distancia; mientras que la vista se basa en las señales luminosas, el oído requiere de estímulos acústicos. Les sigue el sentido del tacto (aunque algunos investigadores lo sitúan al mismo nivel de uso que el oído), que se fundamenta en el contacto mecánico y, también, en la percepción térmica. El olfato y el gusto, que son los dos últimos sentidos (por el uso que se les da), están íntimamente ligados, y se basan principalmente en la detección de sustancias químicas.

En este libro se presentan experiencias relacionadas con los dos sentidos más utilizados por el ser humano: la vista y el oído, cuyas fuentes de información (luz y sonido, respectivamente) comparten características de los fenómenos ondulatorios (con los oportunos matices). Por ello, las cuatro primeras experiencias están dedicadas a introducir nomenclatura y conceptos generales de las ondas, que son comunes al sonido y la luz. En las siguientes veinticuatro experiencias se exponen fenómenos relacionados con las ondas acústicas, en la medida que pueden detectarse (de una forma u otra) por el ser humano.¹ Las últimas treinta y tres experiencias están dedicadas a la realización de actividades en las que intervienen fenómenos que pueden percibirse visualmente. El libro concluye con una selección de referencias bibliográficas que, sin ser exhaustiva ni completa, pretende ayudar a los lectores interesados para que amplíen la información que pudieran necesitar cuando usen las actividades experimentales que contiene este libro.

¹ En algunas experiencias de acústica se ha recurrido a mostrar las ondas sonoras mediante oscilaciones sinusoidales, porque así se ven mejor; pero esto no debe inducir a confusión con las ondas transversales, porque el sonido es una onda longitudinal. La representación mediante oscilaciones corresponde al desplazamiento de las moléculas de aire respecto de su posición de equilibrio.

Cada experiencia contiene la información básica para poder desarrollarla satisfactoriamente. En ella se detalla la relación de materiales necesarios,² el procedimiento de uso, la descripción de lo que debe suceder, así como la correspondiente explicación, todo ello profusamente ilustrado. Se concluye con un apartado de sugerencias y comentarios, donde se indican posibles modificaciones y se incluye información complementaria.

La realización de algunas experiencias requiere el uso de un programa para la grabación de sonido y su posterior edición.³ Ésta es una forma de integrar las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en el desarrollo de los experimentos.

El contenido, nivel, metodología, etc. de las actividades las hace adecuadas tanto en enseñanza secundaria como en Bachillerato, aunque algunas de ellas se pueden emplear también en enseñanza primaria o incluso universitaria, si el profesor las adapta convenientemente. También es posible realizar las experiencias en entornos que no son estrictamente docentes, tales como ferias de ciencia o reuniones de familiares y amigos, pues el propósito final es que los usuarios de las actividades establezcan una relación con la física que resulte enriquecedora y gratificante.

La duración aproximada de cada experiencia depende de quién la realice, pero puede establecerse una hora como tiempo máximo de ejecución. Los materiales necesarios para cada actividad tienen costes asequibles y son fáciles de conseguir, pues se encuentran en la mayoría de centros de enseñanza y, también, en muchos hogares.

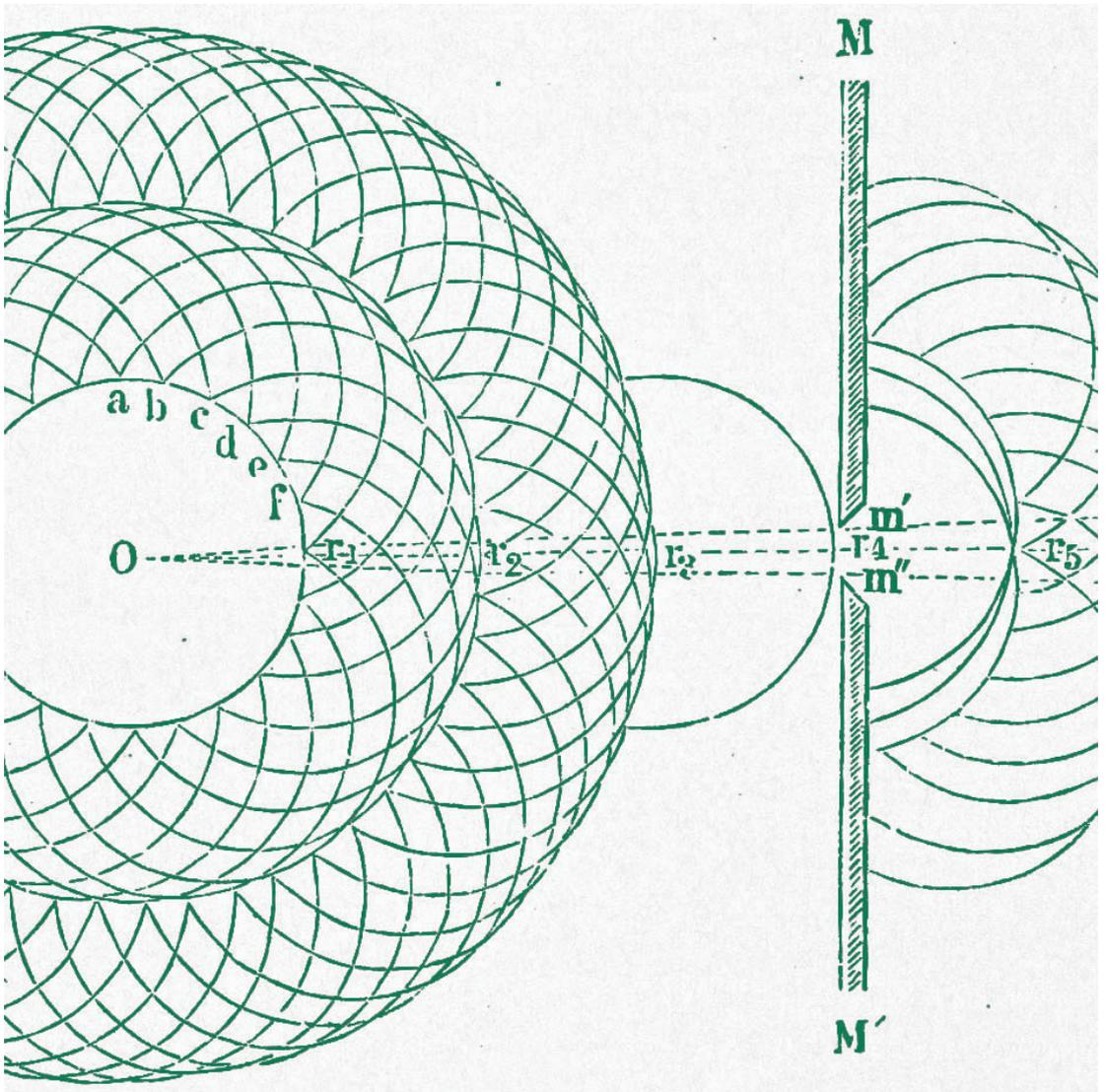
Aunque las actividades experimentales presentadas en este libro no entrañan peligro, siempre se han de adoptar las medidas de seguridad apropiadas para la manipulación segura de instrumentos cortantes, punteros láser, o aparatos eléctricos, por citar algunas de las posibles fuentes de riesgo. En cualquier caso, siempre se ha de tener presente que incluso actividades o materiales aparentemente inocuos pueden causar algún daño cuando se realizan o usan de forma inadecuada.

Finalmente, deseamos expresar nuestro agradecimiento al Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas (IUFFyM) de la Universidad de Salamanca, a la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia y a Editum (Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia) por el apoyo financiero para la edición de este libro, a Sandra Hernández por el diseño de la cubierta y a diversos miembros del profesorado y alumnado del IES Francisco Salinas de Salamanca, así como a Pablo del Mazo y Laura del Mazo, por su colaboración en muchos de los experimentos.

² Los materiales que aquí se utilizan son orientativos y pueden reemplazarse por otros de características similares. Con toda seguridad, la creatividad de los lectores aportará modificaciones a las actividades propuestas que las enriquecerán.

³ El programa que se ha empleado aquí es *Audacity*, que puede descargarse gratuitamente en la siguiente dirección: <http://audacity.es>. Además de este programa, también pueden usarse otros con funciones similares a las requeridas para la realización de las experiencias.

Ondas



1. Ondas en una cuerda

Una cuerda puede servir para conocer algunas magnitudes características de las ondas.

¿Qué se necesita?



Tornillo de mesa

Cuerda de 3 m de longitud y 1 cm de diámetro (aproximadamente)

¿Qué hay que hacer?



Primer experimento

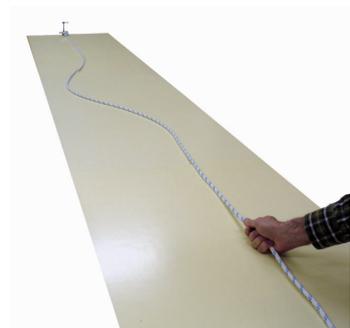
Coloca la cuerda sobre una mesa larga. Fija uno de sus extremos en el tornillo de mesa y, tensándola ligeramente, provoca una sacudida (paralela a la superficie de la mesa) en el otro extremo de la cuerda.

Segundo experimento

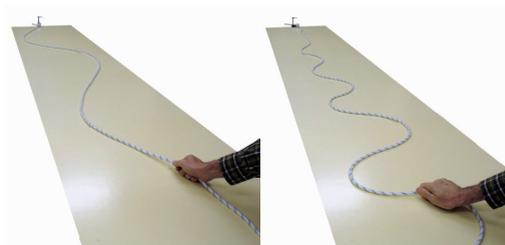
Con la cuerda dispuesta como en el primer experimento provoca sacudidas a un ritmo regular, por ejemplo, una sacudida por segundo. Después aumenta el ritmo, por ejemplo, a tres sacudidas por segundo.

¿Qué sucede?

En el **primer experimento**, la perturbación producida avanza a lo largo de la cuerda hacia el extremo fijo en el tornillo.

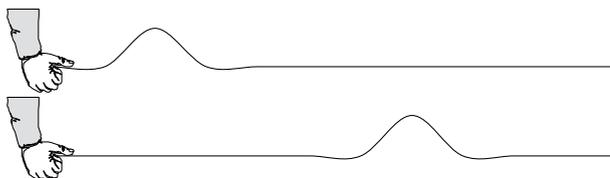


En el **segundo experimento**, en la cuerda se producen ondas. Cuando la cuerda se sacude lentamente se observa que las ondulaciones producidas en la cuerda están muy separadas, pero cuando la cuerda se sacude con mayor rapidez las ondulaciones están más próximas.



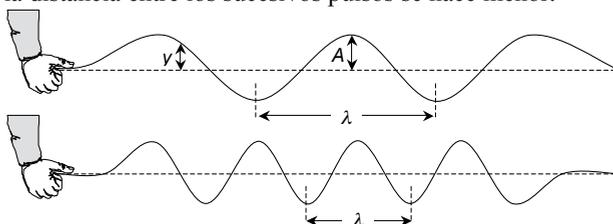
¿Cómo se explica?

Si sobre una cuerda tensa se provoca una sacudida brusca en sentido transversal se crea un pulso que se propaga a lo largo de la cuerda.



Si se producen sacudidas continuadas, cada punto de la cuerda se aparta una distancia, y , de la posición que ocupaba en reposo. Esa distancia se llama *elongación*. La elongación máxima se denomina *amplitud*, A , que será tanto mayor cuanto más intensa sea la sacudida.

Cuando se producen sacudidas continuadas a un ritmo lento (baja *frecuencia*) la distancia entre los sucesivos pulsos (*longitud de onda*) es grande; pero si el ritmo aumenta (alta *frecuencia*) la distancia entre los sucesivos pulsos se hace menor.



La longitud de onda, λ , y la frecuencia, f , son magnitudes inversamente proporcionales y su producto es igual a la velocidad de propagación de la onda, v ,

$$\lambda \cdot f = v$$

Sugerencias y comentarios

Repita los experimentos con cuerdas de diferente longitud, diámetro y material.

También se puede realizar la experiencia disponiendo la cuerda sobre el suelo y atando su extremo a la pata de una mesa o a un poste, por ejemplo.

Observa que las ondas que se han creado con la cuerda (al igual que cualquier otra onda) transmiten energía sin que haya transporte de masa.

La energía de una onda depende cuadráticamente de su amplitud y de su frecuencia, entre otros factores.

2. Ondas longitudinales y transversales en un muelle

En un muelle pueden formarse diferentes tipos de ondas, según como se perturbe.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Primer experimento

Estira el muelle sobre la mesa, fijando un extremo en el tornillo de mesa y manteniendo el otro con la mano. Después, cerca del extremo sujeto con la mano comprime unas cuantas espiras y suéltalas rápidamente.



Segundo experimento

Con el muelle dispuesto como en el primer experimento, se mueve la mano que sujeta el muelle en sentido perpendicular a éste y paralelo a la mesa.

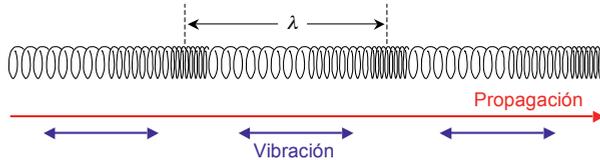
¿Qué sucede?

En el **primer experimento**, se observa una perturbación que avanza longitudinalmente por el muelle.

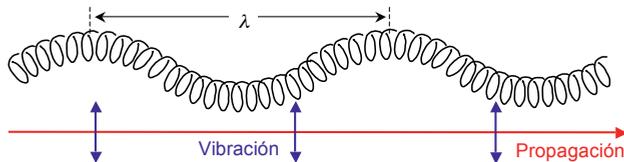
En el **segundo experimento**, se observa una perturbación que se propaga perpendicularmente al muelle.

¿Cómo se explica?

En el primer experimento se producen *ondas longitudinales*. Son ondas en las que la dirección de vibración coincide con la de propagación.



En el segundo experimento se producen *ondas transversales*. Son ondas en las que la dirección de vibración es perpendicular a la de propagación.



Sugerencias y comentarios

Realiza los experimentos con muelles de diferente longitud, diámetro y material.

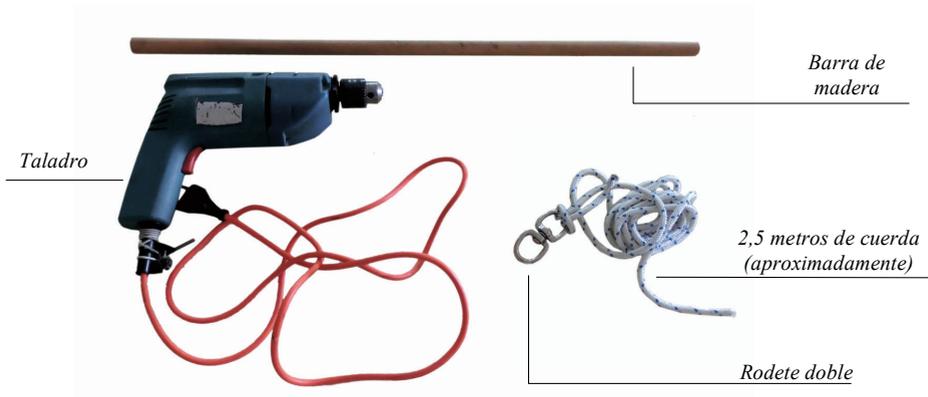
También se puede realizar la experiencia disponiendo el muelle sobre el suelo y atando su extremo a la pata de una mesa o a un poste, por ejemplo.

Si dos personas generan sendos pulsos en cada extremo del muelle, éstos se propagan de forma independiente, pues mantienen su forma después de coincidir en el centro del muelle.

3. Ondas estacionarias transversales en una cuerda

Las ondas producidas en una cuerda presentan una morfología extraordinariamente regular.

¿Qué se necesita?

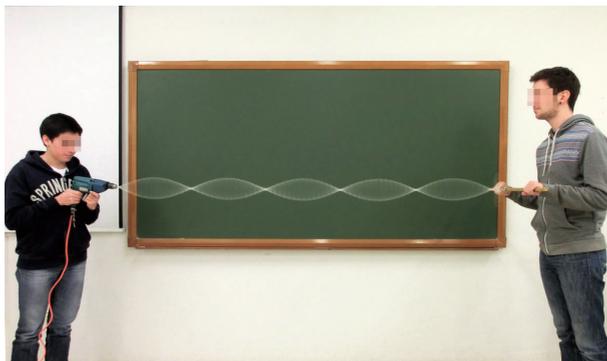


¿Qué hay que hacer?



Aprisiona un extremo de la cuerda con el portabrocas del taladro y anuda el otro extremo al rodete. El giro de la otra parte del rodete se impide con la barra de madera, que debe sujetarse firmemente con las dos manos.

El experimento necesita la participación de dos personas. Una se ocupa del taladro y otra del rodete. La cuerda se mantiene levemente tensa y se pone en marcha el taladro.

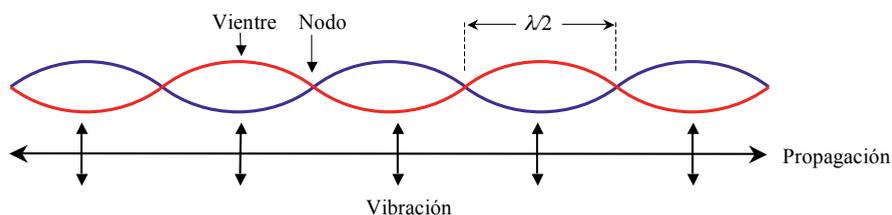


¿Qué sucede?

Se observa que la cuerda forma una estructura periódica. En determinadas posiciones la cuerda se encuentra desplazada respecto de la línea que une el taladro con el rodete y en otras no muestra desplazamiento alguno.

¿Cómo se explica?

Al girar el taladro la cuerda sufre perturbaciones que se propagan transversalmente hasta alcanzar el otro extremo. Al llegar aquí la onda se refleja y la perturbación, que avanza en sentido contrario a la primera, se superpone con ésta. Las dos ondas, de igual longitud de onda y frecuencia, dan lugar a una *onda estacionaria*. En esta onda las posiciones de máxima amplitud son los *vientres* y las de amplitud nula son los *nodos*. La distancia entre dos nodos o dos vientres consecutivos es una semilongitud de onda ($\lambda/2$)



Sugerencias y comentarios

Realiza los experimentos con cuerdas de diferente longitud y grosor. También puedes variar la velocidad con la que gira el taladro.

Observa cómo cambia la onda estacionaria al variar la tensión de la cuerda, para una longitud fija de la misma.

Una versión en pequeño formato del experimento descrito se consigue si reemplazas el taladro por un cepillo de dientes eléctrico (sin el cabezal) y la cuerda por un hilo o una goma elástica.

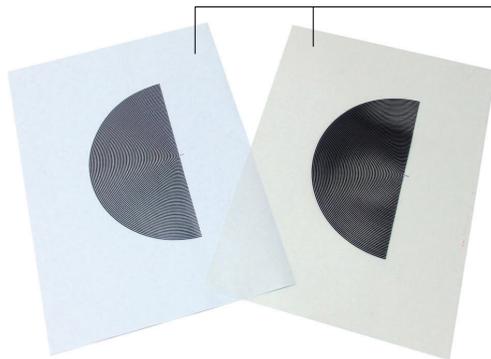
También puedes repetir la experiencia usando una cuerda (o un muelle) sostenida horizontalmente por dos personas. Mientras una de ellas mantiene fijo su extremo la otra sacude rítmicamente el suyo.

4. Simulación de interferencias ondulatorias

Dos movimientos vibratorios que se superponen en un punto pueden intensificarse o anularse.

¿Qué se necesita?

*Dos fotocopias de igual tamaño de la **plantilla para interferencias** que se encuentra al final de esta experiencia; una en papel y otra en hoja transparente de acetato*

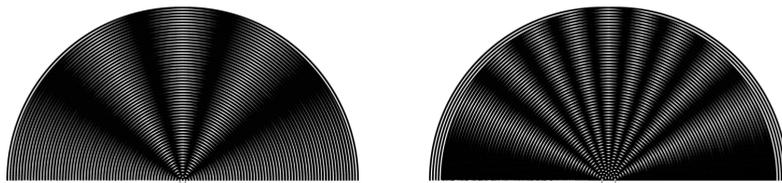


¿Qué hay que hacer?

Pon sobre una mesa la fotocopia en papel y encima la fotocopia en acetato, de modo que los centros de las semicircunferencias concéntricas se encuentren ligeramente desplazados en la dirección del diámetro.

¿Qué sucede?

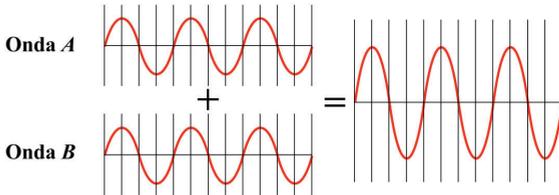
Se observan patrones regulares de zonas claras y oscuras, cuya estructura depende de la separación entre los centros de los semicircunferencias.



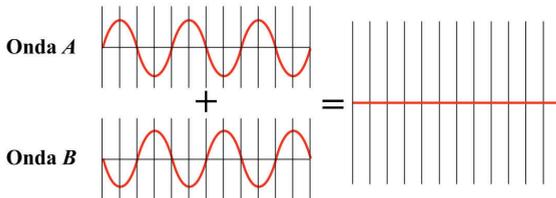
¿Cómo se explica?

El efecto observado simula el fenómeno conocido como *interferencia*, asociado con los movimientos ondulatorios. Según este fenómeno, cuando dos o más ondas alcanzan simultáneamente una misma posición la perturbación producida es la suma algebraica de las perturbaciones que originaría cada una independientemente.

Consideremos el caso de dos ondas, *A* y *B*, de igual longitud de onda, frecuencia y amplitud. Al encontrarse en un punto del medio por el cual se propagan pueden darse dos situaciones extremas. En la primera, las ondas se encuentran en el mismo estado de vibración, por lo que las elongaciones se suman y se produce una *interferencia constructiva*.



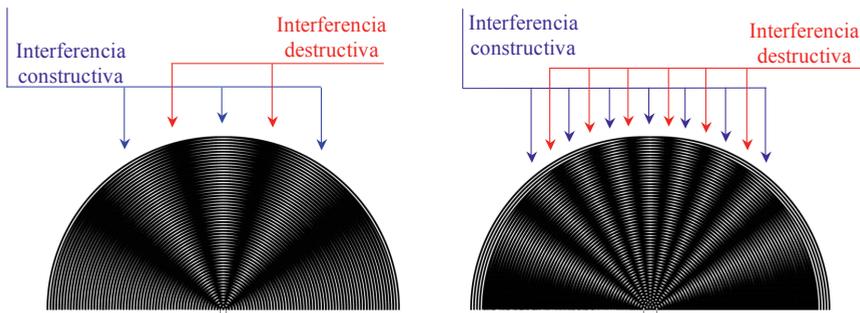
En la segunda situación las ondas se encuentran en estado de vibración opuesto. En este caso, la superposición de las elongaciones equivale a restarlas, lo que produce una *interferencia destructiva*.



Nótese que este resultado solo es posible si ambas ondas tienen la misma amplitud.

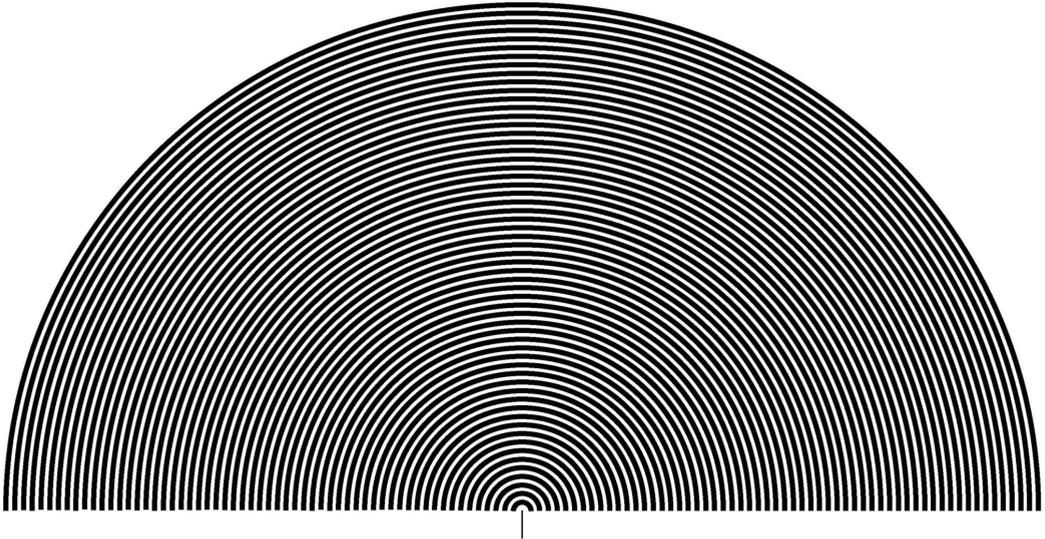
Las imágenes de las dos fotocopias simulan ondas de igual longitud de onda y frecuencia. El centro de las semicircunferencias constituye el foco de la perturbación y las sucesivas semicircunferencias representan la propagación de la onda por el plano, donde las zonas claras y oscuras se corresponden, respectivamente, con las máximas y mínimas elongaciones.

Al superponer las fotocopias hay regiones en las que zonas claras y oscuras de la imagen en papel coinciden, respectivamente, con zonas claras y oscuras de la imagen en acetato (interferencia constructiva). En otras regiones, las zonas claras y oscuras de la fotocopia en papel coinciden, respectivamente con zonas oscuras y claras de la fotocopia en acetato (interferencia destructiva). Por otra parte, se observa que, al aumentar la separación entre los focos, las distancias entre las bandas claras y oscuras disminuyen.



Las interferencias aparecen siempre que ondas –electromagnéticas como la luz o de otra naturaleza, como las sonoras– procedentes de focos diferentes, se superponen en un punto del espacio. Las interferencias son más notables en el caso de ondas de idénticas características.

Plantilla para interferencias



Sugerencias y comentarios

Las figuras obtenidas al superponer las fotocopias creadas con la plantilla de ondas circulares sirven para ilustrar las interferencias producidas en la difracción por una doble rendija.

La plantilla de esta experiencia corresponde a ondas circulares. Trazando líneas rectas paralelas puedes construir plantillas para ondas planas. En este caso, se obtienen las correspondientes figuras de interferencia superponiendo ambas imágenes ligeramente inclinadas una respecto de la otra.

El uso de un programa para tratamiento de imágenes facilita el dibujo de las plantillas, así como la creación de nuevos diseños.

Los patrones (o figuras) de *moiré* son efectos visuales que aparecen cuando se superponen dos láminas transparentes que contienen líneas opacas con periodicidad similar o con la misma periodicidad, pero superponiéndolas ligeramente desplazadas espacial o angularmente.

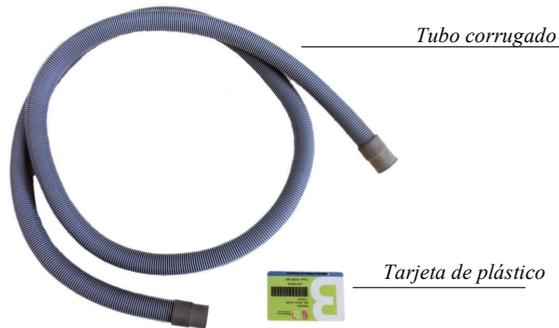
Oír



5. Frecuencia de un sonido

El número de vibraciones por unidad de tiempo determina la frecuencia.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Sujeta el tubo corrugado con una mano y arrastra la tarjeta sobre la superficie de ese tubo con distintas velocidades.



¿Qué sucede?

Al arrastrar la tarjeta se produce un sonido, que es tanto más agudo cuanto mayor es la velocidad de arrastre de la tarjeta.

¿Cómo se explica?

La tarjeta arrastrada golpea rítmicamente en las protuberancias rugosas del tubo, el cual actúa como caja de resonancia y emite un sonido.

El tono es la cualidad del sonido relacionado con la frecuencia. Las frecuencias altas corresponden a los sonidos agudos y las frecuencias bajas a los sonidos graves.

Para un mismo tubo corrugado, con distancia fija entre hendiduras, el arrastre de la tarjeta sobre la superficie produce una vibración cuya frecuencia aumenta con la velocidad de deslizamiento.

Sugerencias y comentarios

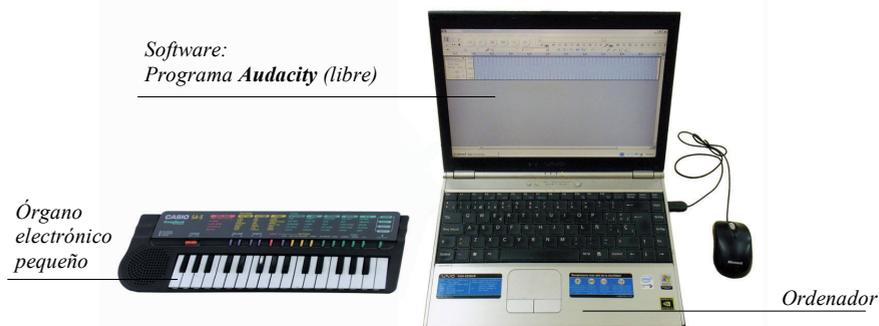
Repita el experimento con tubos de diferente separación entre hendiduras.

En la sección de ritmo y percusión de las orquestas de música caribeña hay un instrumento cuyo funcionamiento se basa en el experimento descrito. Se trata del *güiro* o *guaracha*, fabricado con una calabaza (o tronco hueco) en cuya superficie hay surcos que se raspan con un palillo o baqueta.

6. Timbre

Diferentes sonidos para una misma nota musical.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Abre el programa *Audacity*. En la barra de menús marca *Generar* y selecciona *Tono*.



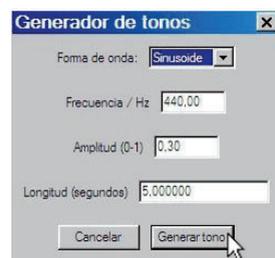
Pulsa en *Tono* y abre el cuadro de diálogo *Generador de tonos*. En *Forma de onda* selecciona “Sinusoide”.

En *Frecuencia / Hz* selecciona “440.00”, que es un *la*.

En *Amplitud (0-1)* selecciona “0.30”.

En *Longitud (segundos)* selecciona “5.000000”.

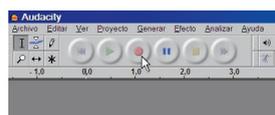
Pulsa en *Generar tono*, para guardar la onda creada.



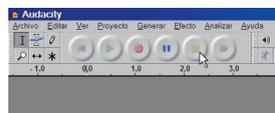
Enciende el órgano y selecciona un instrumento, por ejemplo, “piano”.

En el programa *Audacity* pulsa el botón “Grabar”.

Mantén pulsada en el piano durante 5 segundos la nota *la* (440 Hz).



Pulsa finalmente el botón “Parar” en el programa *Audacity*.

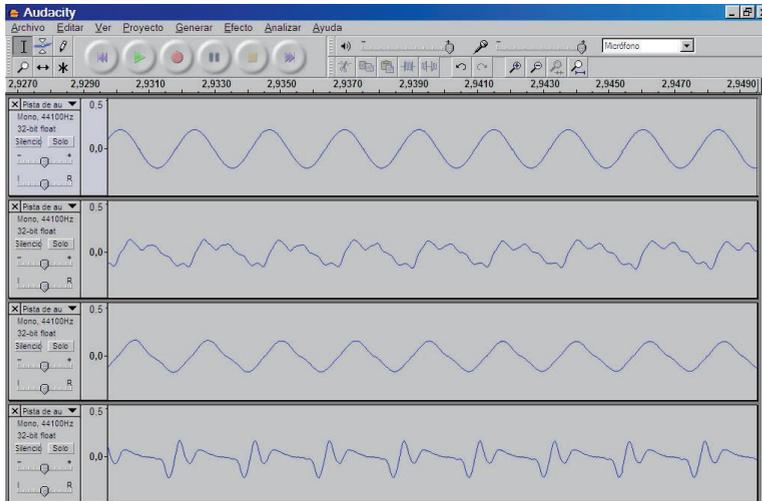


De este modo queda registrada en la pista de audio la nota *la* generada por el órgano funcionando en modo de piano.

Repite otras dos veces el proceso anterior seleccionando dos nuevos instrumentos en el órgano, por ejemplo “flauta” y “violín”.

¿Qué sucede?

La misma nota musical produce ondas con la misma periodicidad, aunque su forma depende del instrumento seleccionado.



Sonido puro

Piano (más rico en armónicos)

Flauta (más parecido al sonido puro)

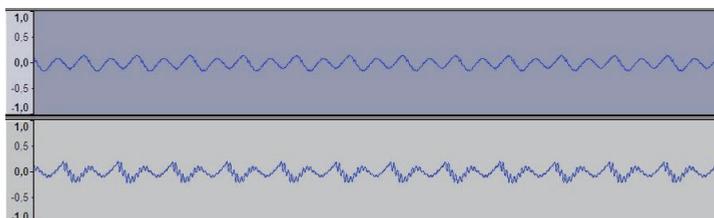
Violín

¿Cómo se explica?

Una de las cualidades del sonido es el *timbre*, gracias al cual es posible discernir qué tipo de instrumento ha originado una nota musical. La misma nota musical emitida por distintos instrumentos tiene diferente forma, aunque la periodicidad (relacionada con el tono o frecuencia) es la misma. Esto se debe a que la nota emitida por cada instrumento corresponde a una onda sonora que consta de varias frecuencias superpuestas, con diferentes amplitudes. A la frecuencia principal (la de mayor amplitud), que en nuestro caso es de 440 Hz (nota *la*) y es la misma en todos los instrumentos, le acompañan otras frecuencias que son múltiplos de la principal y se denominan *armónicos* (o *sobretonos*). La combinación de armónicos que acompañan a la frecuencia fundamental depende de las características de cada instrumento.

Sugerencias y comentarios

Realiza el mismo experimento con el sonido de una vocal –por ejemplo la “i”– emitido por dos personas diferentes.



7. Excitación de armónicos

Una onda compleja se puede construir a partir de ondas simples, o modos de vibración denominados armónicos, cuyas frecuencias están relacionadas entre sí. Usualmente se oye con mayor intensidad el primer armónico o modo fundamental, pero, a veces, se pueden diferenciar los siguientes armónicos.

¿Qué se necesita?

Flauta dulce



Tubo de ensayo



¿Qué hay que hacer?



Primer experimento

Toca, soplando suavemente, una nota de la flauta dulce, por ejemplo el *do*.

Vuelve a tocar la misma nota en la flauta dulce, pero ahora soplando muy fuerte, lo que aumenta la velocidad del chorro de aire.



Segundo experimento

Coloca el tubo de ensayo debajo del labio inferior y sopla suavemente dirigiendo el chorro hacia el borde del tubo.

Vuelve a soplar en el tubo de ensayo, pero ahora fuertemente.

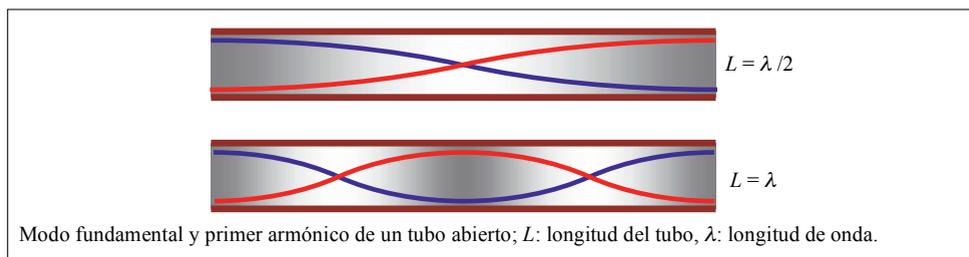
¿Qué sucede?

Tanto para la flauta como para el tubo de ensayo, el sonido que se oye cuando se sopla más fuerte es más agudo que el que se oye cuando se sopla de forma suave. Este efecto es más notable con el tubo que con la flauta.

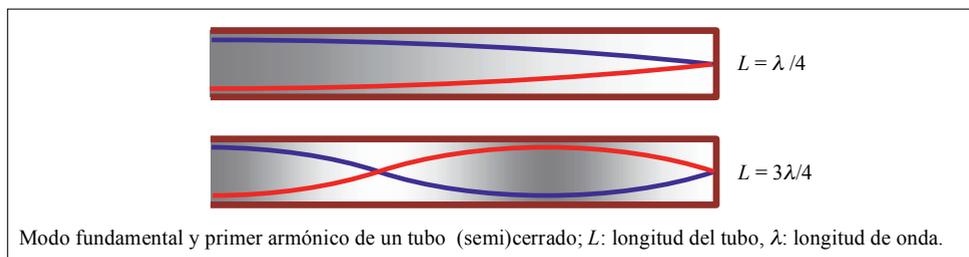
¿Cómo se explica?

Sin cambiar la configuración del instrumento musical, al soplar más fuerte se puede generar una onda donde predomine un armónico que no es el fundamental.

La flauta dulce se comporta como un tubo abierto. Una nota está formada por la frecuencia fundamental y sus armónicos. En el caso de un tubo abierto las frecuencias de los armónicos son múltiplos enteros de la del fundamental. Al soplar suavemente se excita esencialmente el modo fundamental o primer armónico, pero al soplar fuertemente se excita el segundo armónico cuya frecuencia es doble que la del fundamental, por lo que la flauta suena más aguda. Si se sopla todavía más fuerte se puede llegar a excitar el tercer armónico.



El tubo de ensayo se comporta como un tubo (semi)cerrado. El sonido producido al soplar sobre el tubo está formado por la frecuencia fundamental, o frecuencia de resonancia del tubo, y sus armónicos. Al soplar suavemente se excita esencialmente el modo fundamental o primer armónico, pero al soplar fuertemente se excita el segundo armónico, cuya frecuencia es, en este caso, triple que la del fundamental. Por este motivo, ahora el sonido del tubo es más agudo.



Sugerencias y comentarios

En el caso de la flauta se puede probar tocando otras notas.

La medición de las frecuencias se puede realizar con un frecuencímetro o afinador de instrumentos (disponible como una aplicación para móviles), o mediante el programa *Audacity* y un ordenador.

8. Paraguas mensajeros

Todas las ondas, incluidas las sonoras, se reflejan cuando inciden sobre un obstáculo.

¿Qué se necesita?



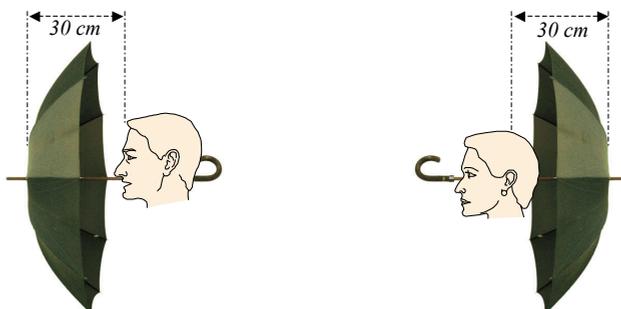
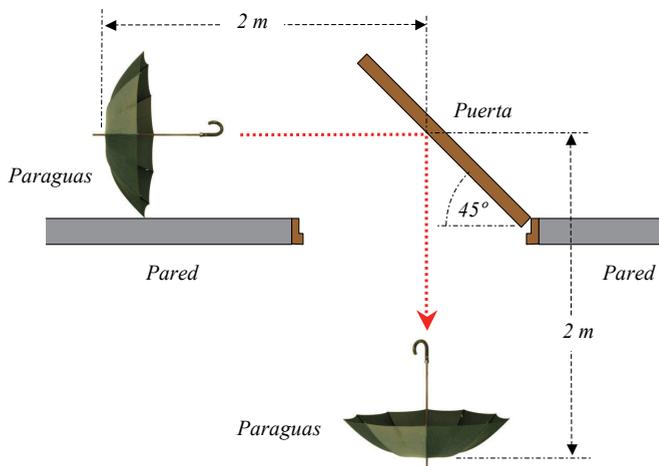
¿Qué hay que hacer?

Dos personas se sitúan en dependencias contiguas, separadas por una puerta abierta 45° , tal y como se muestra en la figura.

Cada persona sostiene un paraguas abierto, con el bastón en posición horizontal, a la altura del pecho.

Es importante que la tela de los paraguas esté bien tensa. Si se humedece la tela de los paraguas mejora el efecto que se detectará.

Una de las personas habla en voz baja (susurra) situando la boca próxima al bastón del paraguas, a una distancia de unos 30 cm de su cúpula. La segunda persona sitúa una oreja en la posición equivalente a la de la boca de la primera persona.



¿Qué sucede?

Cuando la puerta está abierta 45° , la segunda persona es capaz de escuchar claramente lo que habla la primera persona, aunque lo haga en voz baja.

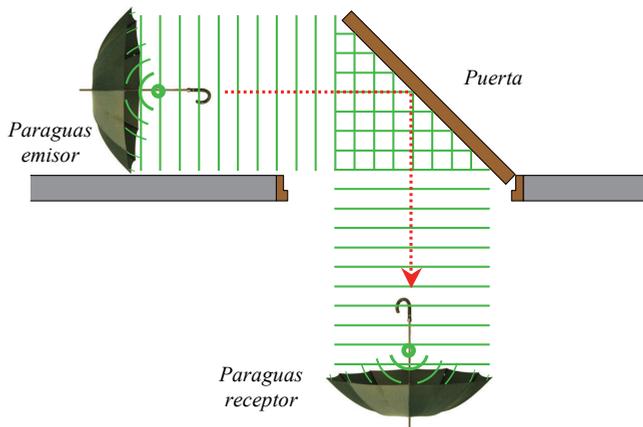
Cuando la puerta está abierta 90° , la segunda persona no escucha lo que habla la primera.

¿Cómo se explica?

Los paraguas se comportan para el sonido como espejos esféricos y la puerta como un espejo plano.

La boca y el oído se encuentran próximos a los “focos” de los paraguas, representados en la figura por el punto que se halla a mitad de distancia entre la empuñadura y la cúpula del paraguas (los focos de un espejo esférico se hallan a una distancia que es la mitad de su radio de curvatura). El sonido producido frente al paraguas emisor se refleja en éste y se dirige hacia la puerta, que lo desvía 90° hacia el paraguas receptor, que lo concentra sobre su “foco”, donde se encuentra la oreja.

Cuando la puerta se abre 90° el sonido se refleja en la puerta pero no es desviado hacia el paraguas receptor.



Sugerencias y comentarios

Con la puerta abierta 45° , comprueba que si se cierra el paraguas emisor o el receptor, la persona que está junto al último deja de escuchar el sonido que proviene del primero, manteniendo las orientaciones de ambas personas.

También se puede repetir la experiencia situando al emisor y al receptor en un pasillo, separados aproximadamente 10 m.

9. Lente acústica

Las ondas sonoras se refractan cuando pasan del aire a otro gas, donde la velocidad del sonido es diferente.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



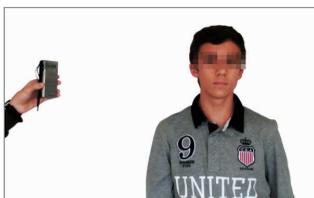
Pon 35 g, aproximadamente, de carbonato de calcio en la botella.



Mediante el embudo añade 225 mL, aproximadamente, de ácido clorhídrico comercial (hay que manejarlo con precaución, porque es corrosivo). La reacción con carbonato de calcio produce dióxido de carbono (CO_2).



Retira el embudo, encaja rápidamente el globo en la boca de la botella y espera a que el globo se llene de dióxido de carbono.



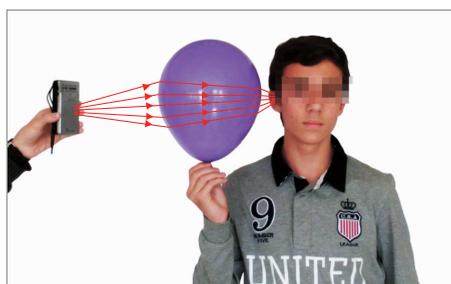
Enciende el aparato de radio y ponlo a bajo volumen, a una distancia de un metro, aproximadamente, del oído de un voluntario. Después, esta persona interpone el globo con dióxido de carbono entre la radio y su oído. Finalmente, lo retira.

¿Qué sucede?

Cuando el globo se encuentra entre el aparato de radio y el oído, el sonido es más intenso que cuando el globo se retira.

¿Cómo se explica?

La velocidad del sonido en el globo lleno de dióxido de carbono es menor que en el aire. Esto se debe principalmente a que la masa molar de este gas es mayor que la del aire.* En consecuencia, cuando el sonido pasa por el globo se refracta, como la luz al pasar por una lente convergente, y lo concentra en una pequeña zona (justo donde se ha colocado el oído).



Sugerencias y comentarios

Si se utiliza un globo de paredes finas o usado previamente, se hinchará más fácilmente.

Puede realizarse el mismo experimento llenando globos con gases de menor masa molar que la del aire, como el helio o el hidrógeno (este último requiere precaución, por tratarse de un gas inflamable). En estos gases, la velocidad del sonido es mayor que en el aire. Por ello, cuando el sonido atraviesa el globo, se refracta como la luz al pasar por una lente divergente. Esto da lugar a que la intensidad del sonido se reduzca.

Se puede repetir la experiencia reemplazando la persona que escucha el sonido por un micrófono conectado a un ordenador con el programa *Audacity*. Acercando o alejando el micrófono respecto al globo, se puede localizar el foco de la lente acústica, que es el punto donde se percibe el sonido con mayor intensidad.

Otra posibilidad para llenar el globo de dióxido de carbono es emplear vinagre y bicarbonato de sodio, en lugar de ácido clorhídrico y carbonato de calcio.

* La velocidad del sonido, v , en un gas ideal es $v = \sqrt{\gamma RT/M}$, donde R es la constante de los gases, T es la temperatura absoluta, M es la masa molar del gas y γ es el cociente entre los calores molares a presión y volumen constante, respectivamente. El valor de γ depende de la estructura molecular y es aproximadamente 1,7 para gases monoatómicos (como He), 1,4 para gases diatómicos (como H_2 , N_2 y O_2) y 1,3 para gases triatómicos (como CO_2).

10. Interferencias sonoras

La superposición de dos sonidos iguales puede aumentar o disminuir la intensidad sonora.

¿Qué se necesita?

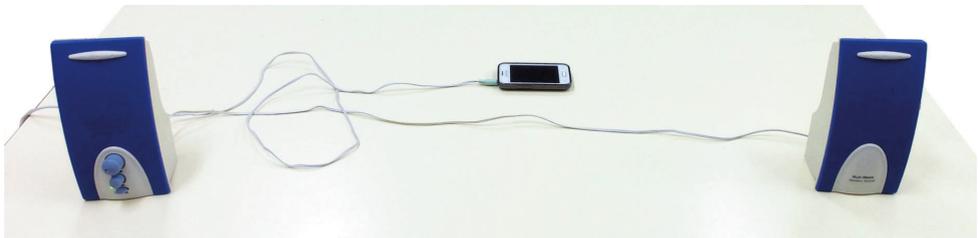
*Dos altavoces
con amplificador
incorporado*

*Teléfono móvil con
aplicación de generador
de ondas*

Cinta métrica



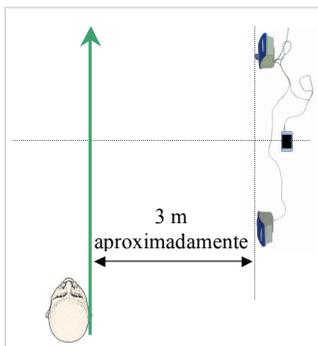
¿Qué hay que hacer?



En una habitación despejada, sitúa los altavoces separados 80 cm aproximadamente, orientados en un mismo sentido, perpendicularmente a la línea que los une. Conecta los altavoces al teléfono móvil, abre la aplicación del generador de ondas y selecciona una frecuencia de, por ejemplo, 1000 Hz. Asegúrate de que ambos altavoces emiten con la misma intensidad sonora.



Muévete lentamente a lo largo de una línea separada unos tres metros de la recta que une los altavoces.



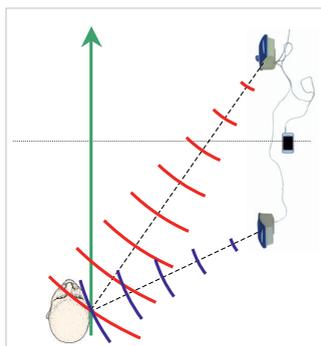
¿Qué sucede?

A lo largo del recorrido se detectan posiciones en las que el sonido es más intenso y otras en las que es más débil. El punto del recorrido equidistante de los altavoces corresponde siempre a un sonido intenso.

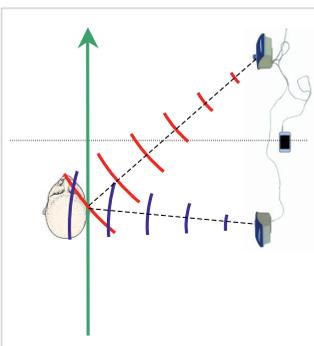
¿Cómo se explica?

Los altavoces son dos fuentes sonoras que emiten a la misma frecuencia. Como el sonido tiene carácter ondulatorio, pueden darse dos situaciones extremas:^{*}

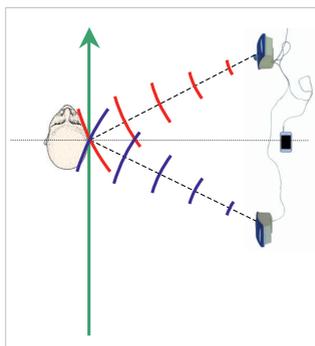
- Que la persona se encuentre en un punto del espacio en el que las ondas procedentes de los dos altavoces se hallen en la misma fase de vibración. En ese caso hay una *interferencia constructiva* y se percibe un sonido intenso.
- Que la persona se encuentre en un punto del espacio en el que las ondas procedentes de los dos altavoces se hallen en oposición de fase. En ese caso hay una *interferencia destructiva* y se percibe un sonido débil.



Interferencia constructiva.
Se percibe un sonido intenso.



Interferencia destructiva.
Se percibe un sonido débil.



Interferencia constructiva.
Se percibe un sonido intenso.

^{*} Véase la experiencia 4.

Sugerencias y comentarios

Repita la experiencia realizando los siguientes cambios:

1. Manteniendo el mismo recorrido, cambia la frecuencia del sonido.
2. Realiza el recorrido a diferentes distancias de los altavoces sin modificar la frecuencia del sonido.

El uso de un micrófono, conectado a un ordenador con el programa *Audacity*, permite localizar con mayor precisión los lugares donde hay interferencia constructiva o destructiva.

11. Sonido por un tubo

Las ondas sonoras se desvían de su trayectoria cuando emergen a través de una abertura.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Apoya los extremos del tubo en dos de las pinzas con soporte. Frente a uno de los extremos del tubo coloca el aparato de radio, con el volumen bajo.

Una persona sitúa el oído, frente al otro extremo del tubo, a una distancia de unos 20 cm. A continuación va desplazando la cabeza, de forma que su oído describa arcos de circunferencia centrados en el extremo del tubo, a ambos lados de la posición inicial.



¿Qué sucede?

La persona percibe que el sonido procede del extremo *O* del tubo. El sonido se escucha con mayor intensidad en la posición *A* y se va reduciendo levemente hacia los extremos del arco *BC*.

¿Cómo se explica?

El sonido se propaga por el interior del tubo, desde el extremo en el que se encuentra la fuente sonora hasta el otro extremo abierto. Los bordes de este extremo se convierten en centros emisores, de acuerdo con el principio de Huygens. Este fenómeno característico de las ondas se denomina *difracción*.



Sugerencias y comentarios

Realiza el experimento con un tubo flexible de bastante longitud (por ejemplo una manguera de riego o un tubo corrugado), de modo que la fuente sonora pueda estar en una habitación y el receptor en otra. La puerta que comunica las habitaciones ha de estar lo más cerrada posible, para evitar que pueda escucharse el sonido directo.

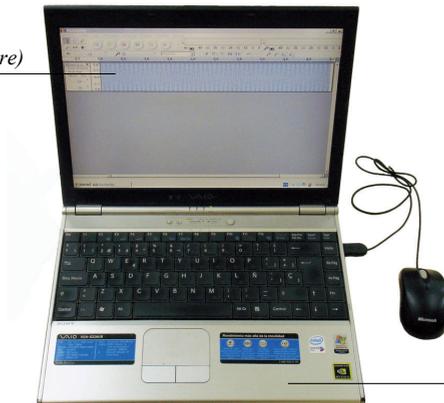
Mediante un micrófono, conectado a un ordenador con el programa *Audacity*, se puede detectar cómo varía la intensidad del sonido a lo largo del arco *BC*.

12. Batidos

La apreciación de batidos por el oído cuando instrumentos musicales idénticos tocan la misma nota indica que no están afinados.

¿Qué se necesita?

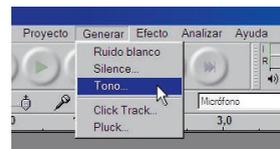
Software:
Programa Audacity (libre)



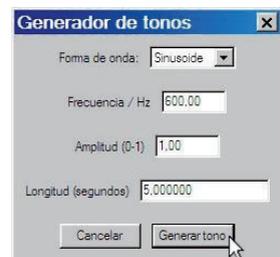
Ordenador

¿Qué hay que hacer?

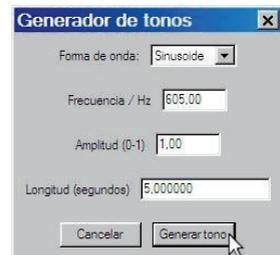
Abre el programa *Audacity*.
En la barra de menús marca *Generar* y selecciona *Tono*.



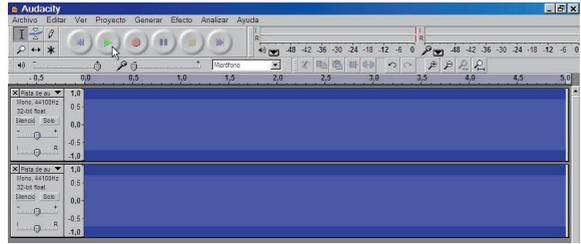
Pulsa en *Tono* y abre el cuadro de diálogo *Generador de tonos*.
En *Forma de onda* selecciona “Sinusoide”.
En *Frecuencia / Hz* selecciona “600.00”.
En *Amplitud (0-1)* selecciona “1.00”.
En *Longitud (segundos)* selecciona “5.000000”.
Pulsa en *Generar tono*, para guardar el primer sonido que has creado.



Vuelve a pulsar en *Tono* y abre de nuevo el cuadro de diálogo *Generador de tonos*.
En *Forma de onda* selecciona “Sinusoide”.
En *Frecuencia / Hz* selecciona “605.00”.
En *Amplitud (0-1)* selecciona “1.00”.
En *Longitud (segundos)* selecciona “5.000000”.
Pulsa en *Generar tono*, para guardar el segundo sonido que has creado.



Pulsa el botón de “Play” para escuchar a la vez los dos sonidos generados.

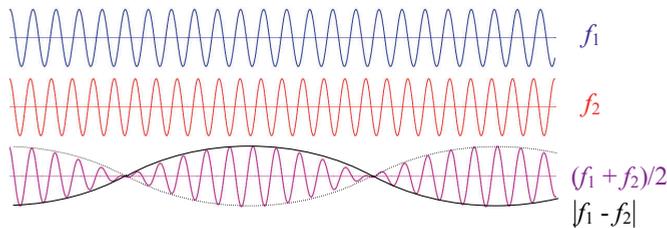


¿Qué sucede?

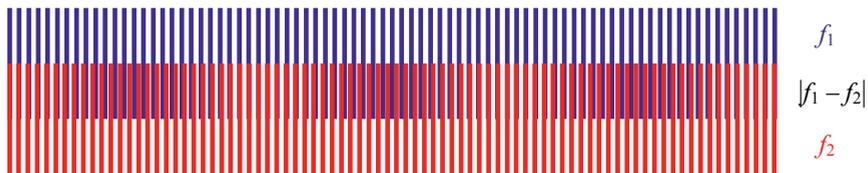
El oído percibe que el sonido aumenta y disminuye su intensidad a intervalos regulares. Este fenómeno se denomina *batido* o *pulsación*.

¿Cómo se explica?

Cuando se superponen dos ondas sonoras de frecuencias f_1 y f_2 muy próximas se produce una onda con una frecuencia igual a la media aritmética de las frecuencias que se superponen, $(f_1 + f_2)/2$, cuya amplitud varía en el tiempo con una frecuencia igual a la diferencia de tales frecuencias, $|f_1 - f_2|$.



La percepción de batidos por el oído cuando le llegan simultáneamente dos ondas sonoras de frecuencias muy próximas se ilustra en el siguiente esquema, donde se representan los frentes de onda correspondientes a ambos sonidos. A intervalos regulares las ondas se encuentran en fase o en oposición, representadas respectivamente por las regiones claras y oscuras de la franja central. Esto provoca la aparición de altibajos en la intensidad sonora percibida por el oído.



Sugerencias y comentarios

Selecciona dos ondas sonoras con diferentes diferencias de frecuencias (por ejemplo 600 Hz y 602 Hz, 600 Hz y 610 Hz...) y compara las correspondientes percepciones sonoras.

También se pueden generar batidos haciendo uso de dos diapasones idénticos, pero añadiendo a uno de ellos una pequeña masa (por ejemplo, un trocito de plastilina). Otra forma es utilizar dos móviles idénticos con una aplicación para la generación de sonido.

13. Altibajos de un diapasón

La intensidad del sonido producido por un diapasón varía con su orientación.

¿Qué se necesita?

*Macillo con
cabeza de goma*



Diapasón de 1000 Hz



¿Qué hay que hacer?

Sujeta con una mano el diapasón y hazlo vibrar golpeándolo con el macillo. Manteniendo el brazo extendido, perpendicular a los oídos, oriéntalo sucesivamente en las dos posiciones que se muestran en la imagen.



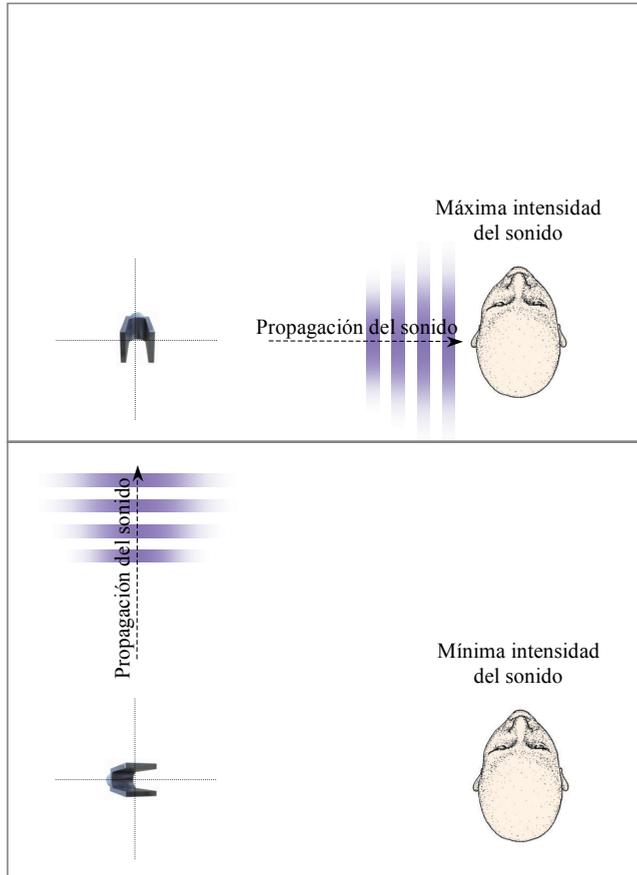
¿Qué sucede?

Cuando la dirección de vibración de las ramas del diapasón está orientada hacia el oído, la intensidad del sonido es máxima. En cambio, la intensidad sonora es mínima cuando el diapasón gira 90° respecto a la primera orientación. Así pues se percibirán dos máximos y dos mínimos en un giro completo del diapasón.

¿Cómo se explica?

Las ondas sonoras son ondas longitudinales. Eso significa que la dirección de vibración de la onda coincide con la de su propagación.

Cuando las ramas de un diapasón vibran, se separan y aproximan provocando sucesivas compresiones y expansiones del aire circundante. Las compresiones y expansiones son máximas en la dirección del movimiento de las ramas, por lo que se percibe máxima intensidad cuando esa dirección está orientada hacia el oído.



Sugerencias y comentarios

Usa un micrófono, conectado a un ordenador con el programa *Audacity*, para registrar el sonido emitido por el diapasón.

Un diapasón vibrando es un emisor de sonido bastante complejo que muestra patrones direccionales diferentes a pequeñas y grandes distancias. Compara el sonido producido por el diapasón cuando éste se hace girar de forma continua cerca y lejos del oído. A distancias cortas percibirás cuatro máximos y cuatro mínimos en un giro completo del diapasón.

14. Botellas sintonizadas

Dos objetos idénticos tienen las mismas frecuencias características.

¿Qué se necesita?

Dos botellas iguales de vidrio

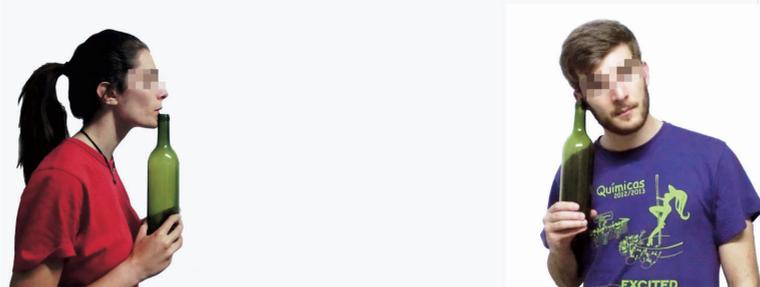


¿Qué hay que hacer?

Este experimento necesita dos personas. Cada una de ellas, con una botella de vidrio, que se mantendrá siempre en posición vertical. Las personas se situarán a dos metros aproximadamente una de la otra.

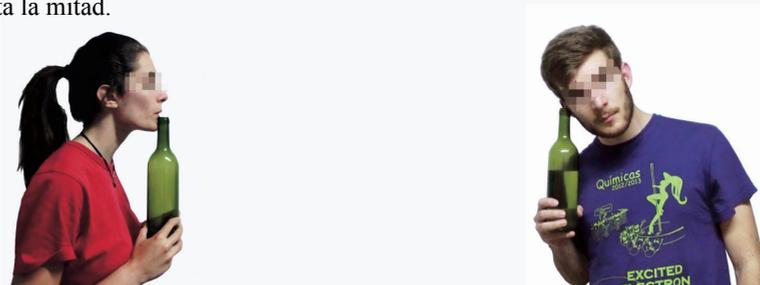
Primer experimento

Las dos botellas estarán vacías. Una de las personas colocará la boca de su botella junto a uno de los oídos. La otra persona soplará por la boca de su botella para que emita un sonido (el chorro de aire debe incidir oblicuamente en la boca de la botella).



Segundo experimento

Se repite la experiencia anterior, pero ahora una de las botellas estará vacía y la otra con agua hasta la mitad.



¿Qué sucede?

En el **primer experimento**, al soplar en la botella se producirá un sonido. La segunda persona oírán este mismo sonido con la sensación de que procede de la botella que tiene sujeta junto a su oído.

En el **segundo experimento**, si se sopla en la botella vacía se oírán el mismo sonido que en el experimento anterior y, si se sopla la botella con agua, se producirá un sonido más agudo. En cualquiera de ambos casos, la segunda persona oírán el correspondiente sonido, pero ahora sin tener la sensación de que dicho sonido sale de su botella.

¿Cómo se explica?

Cada botella de vidrio tiene su propia frecuencia de vibración. Esta frecuencia depende de la forma y de la capacidad de la botella (véase la experiencia 19). Dos botellas iguales tienen la misma frecuencia de vibración. El sonido de la botella en la que se sopla provoca que la otra botella produzca un sonido con la misma frecuencia. Este fenómeno se conoce como *resonancia*.

Sugerencias y comentarios

Para el segundo experimento, en vez de rellenar con agua una de las botellas, puede utilizarse una tercera botella diferente (en forma, en tamaño...) a la que se sopla.

Intenta que una botella entre en resonancia con sonidos de diferente frecuencia generados mediante el programa *Audacity*.

Emite una nota con una flauta dulce (o con *Audacity*) cerca de una probeta, a la cual se le añade agua poco a poco hasta escuchar que entra en resonancia. Puedes comprobar que, en este caso, la superficie del agua vibra suavemente. Si añades más agua, dejará de escucharse la resonancia en la probeta.

15. Efecto Doppler

La sirena de una ambulancia se escucha más aguda a medida que se nos acerca y más grave cuando se aleja.

¿Qué se necesita?

Diapasón de 1000 Hz



Cuerda de 1,5 m de longitud, aproximadamente



¿Qué hay que hacer?

Ata bien la cuerda al diapasón, hazlo vibrar y gíralo rápidamente, con ayuda de la cuerda, por encima de la cabeza.

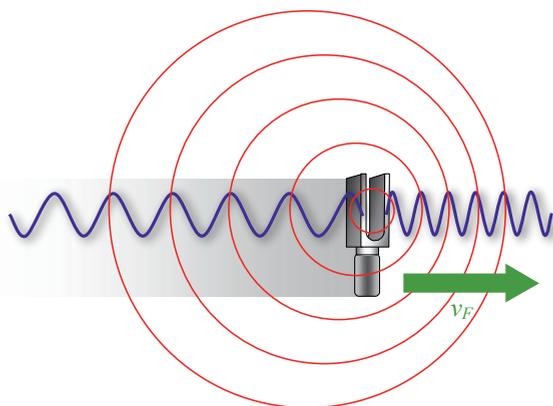


¿Qué sucede?

Una persona, a la que se denominará receptor, próxima a la que hace girar el diapasón percibe el sonido alternativamente más agudo y más grave durante el giro. Cuando el diapasón se acerca a la posición del receptor, el sonido se nota más agudo, mientras que cuando se aleja del receptor el sonido se percibe más grave. El resultado son *altibajos* en la frecuencia percibida.

¿Cómo se explica?

La frecuencia percibida por el receptor de un sonido emitido por un foco sonoro depende de la velocidad relativa entre ambos. Cuando el foco sonoro se aproxima al receptor, el sonido percibido por éste se escucha más intenso y más agudo. Por el contrario, cuando el foco sonoro se aleja del receptor, el sonido percibido por éste se escucha menos intenso y más grave. Este fenómeno se conoce como *efecto Doppler*.*



La relación entre la frecuencia emitida f y la frecuencia percibida f' viene dada por:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v \pm v_R}{v \pm v_F} \right)$$

donde v es la velocidad del sonido, v_R la velocidad del receptor y v_F la velocidad del foco sonoro. Para la elección de los signos se tiene en cuenta que la frecuencia aumenta cuando el foco se acerca al receptor o cuando éste se acerca al foco.

Sugerencias y comentarios

Se puede sustituir el diapasón por un generador de frecuencias (por ejemplo, un móvil con dicha aplicación) o por un zumbador eléctrico (con pila incorporada).

También puede columpiarse una persona sosteniendo la fuente sonora, mientras que otra persona escucha inmóvil.

* Explicado en 1842 por Christian Doppler (1803-1853).

16. Velocidad del sonido, con un tubo

Cronometrando el sonido.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Mide la longitud, L , del tubo.

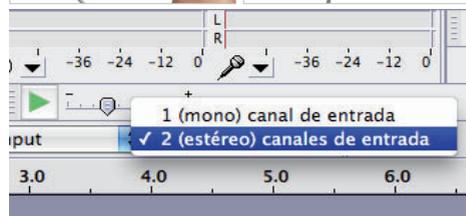
Una persona sujeta con cada mano los extremos del tubo corrugado, de modo que estén separados al menos un metro.

En cada extremo se introduce un auricular. Uno de ellos se sujeta con plastilina, de forma que ese extremo del tubo quede cerrado. Otra persona mantiene la madera y el martillo junto al otro extremo del tubo.

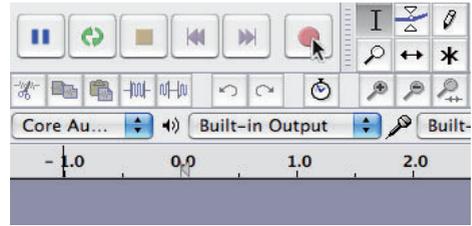
Conecta los auriculares a la entrada de audio del ordenador. En estas condiciones los auriculares funcionarán como micrófonos independientes.



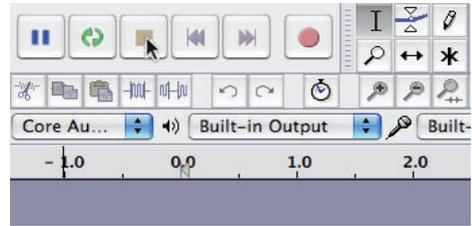
Abre el programa *Audacity*. En canales de entrada elige la opción *estéreo*.



Pulsa el botón *Grabar* e, inmediatamente, golpea varias veces la madera con el martillo a intervalos de uno o dos segundos.

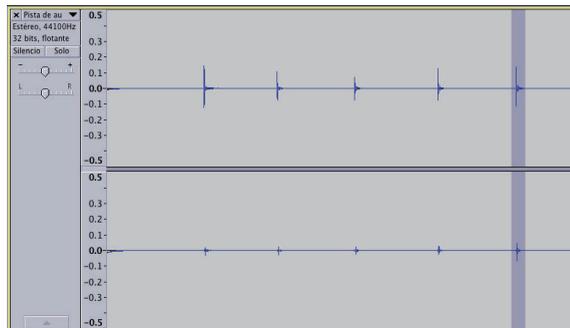


Pulsa finalmente el botón *Detener*. De este modo, queda registrado en cada canal el sonido percibido por cada auricular.



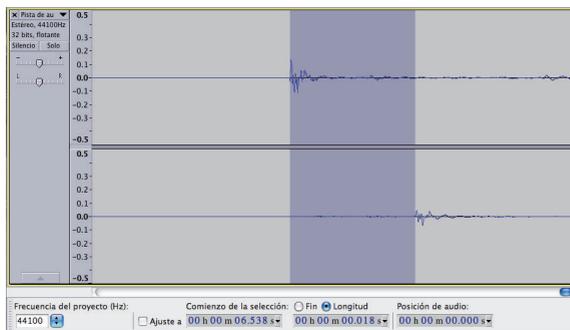
¿Qué sucede?

Cada golpe queda registrado con una pequeña diferencia de tiempo en ambos canales. Se selecciona el intervalo de tiempo correspondiente a uno de los golpes.



Utilizando las herramientas de “zoom” se amplifica el intervalo de tiempo seleccionado (que es la franja vertical oscura a la derecha de la figura).

Se mide el intervalo de tiempo entre el comienzo de las señales de cada canal. En el marcador central que hay en la parte inferior de la pantalla aparece dicho valor, t .



¿Cómo se explica?

El intervalo de tiempo, t , es el que tarda el sonido en propagarse a través del tubo desde el extremo próximo al lugar donde se golpeó la madera hasta el extremo cerrado con plastilina. Conocida la longitud, L , del tubo puede calcularse la velocidad del sonido en el aire, que es:

$$v = \frac{L}{t}$$

En nuestro caso: $L = 5,75 \text{ m}$ y $t = 0,018 \text{ s}$.

Por tanto:

$$v = \frac{5,75 \text{ m}}{0,018 \text{ s}} \approx 319 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El resultado obtenido es aceptable dado el método empleado, puesto que la velocidad del sonido a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es 344 m/s .

Sugerencias y comentarios

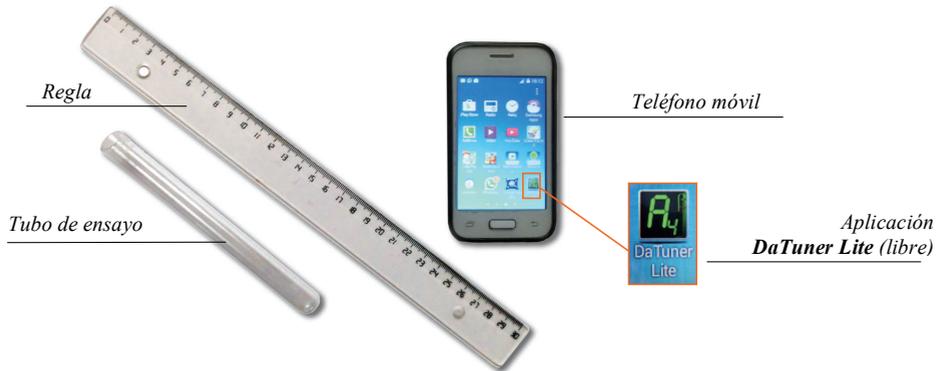
Usa tubos de mayor longitud para que la determinación de la velocidad del sonido sea más precisa.

Habrás observado que hemos empleado los auriculares (dispositivos para emitir sonidos) como si fueran micrófonos (dispositivos para registrar sonidos). Esto es posible porque el fundamento operativo de un micrófono y un auricular (o altavoz) es, en esencia, el mismo. En el primer caso, la vibración de una membrana unida a una bobina (situada alrededor de un imán) induce una corriente eléctrica, mientras que en el segundo caso, la corriente eléctrica produce la vibración de la membrana.

17. Velocidad del sonido, soplando

Algunas aplicaciones de los teléfonos móviles son de gran utilidad para medir magnitudes físicas.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Mide la longitud, L , del tubo.



Abre la aplicación *DaTuner Lite* y sopla lateralmente por el extremo abierto del tubo (de forma análoga a como soplabas en la botella de la experiencia 14), mientras mantienes éste cerca del teléfono móvil.

Anota el valor de la frecuencia registrada por la aplicación.

¿Qué sucede?

El tubo emite un sonido con una frecuencia característica, f , que es la que registra la aplicación *DaTuner Lite*. Con este valor y el de la longitud del tubo de ensayo, L , puede calcularse la velocidad del sonido, v , a partir de la expresión:

$$v = 4L \cdot f$$

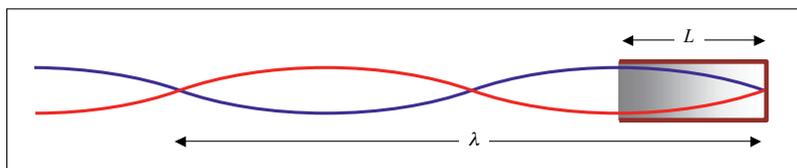
Con $L = 0,150$ m y $f = 553,5$ Hz se obtiene:

$$v = 4 \times 0,150 \times 553,5 = 332 \text{ m/s}$$

¿Cómo se explica?

La columna de aire contenida en el tubo puede vibrar longitudinalmente. Al soplar lateralmente de forma suave por el extremo abierto del tubo se produce una onda estacionaria, con un vientre en el extremo abierto y un nodo en el cerrado.* El sonido fundamental de dicho tubo se producirá para una longitud de onda λ que sea igual a cuatro veces la longitud L del tubo.

$$\lambda = 4L$$



La longitud de onda λ y la frecuencia f están relacionadas con la velocidad de la onda, v , por medio de la expresión:

$$\lambda \cdot f = v$$

Al combinar las ecuaciones anteriores se obtiene para la velocidad del sonido:

$$v = 4L \cdot f$$

Sugerencias y comentarios

El valor obtenido por este procedimiento es ligeramente inferior al de la velocidad real (aproximadamente 344 m/s a 20 °C). Puede hacerse una corrección sustituyendo la longitud L por una longitud efectiva L' , cuyo valor es:

$$L' = L + 0,61 r$$

donde r representa el radio interior del tubo. En nuestro caso, el radio del tubo era $r = 0,6$ cm. Por lo tanto, el resultado que se obtiene para la velocidad del sonido es 340 m/s, que se acerca más al valor de referencia a 20 °C.

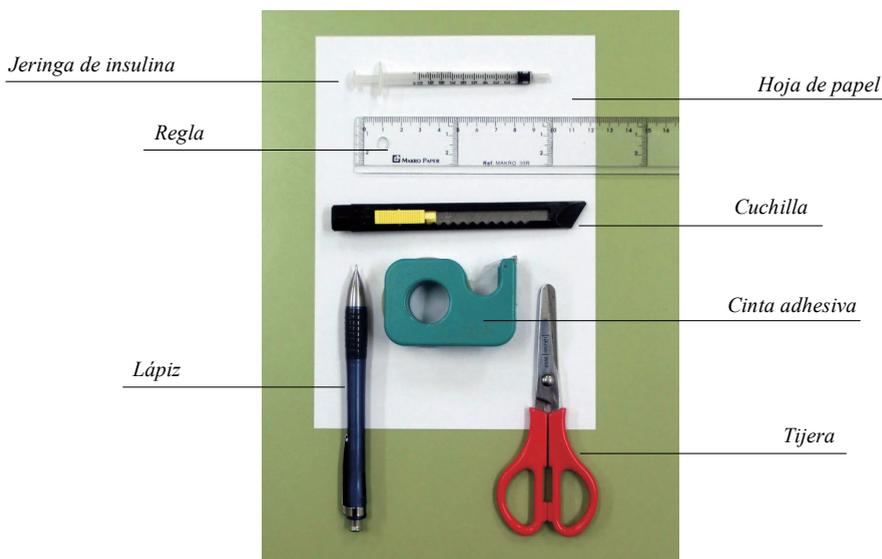
Comprueba la constancia de la velocidad del sonido empleando tubos rígidos cerrados por un extremo, de diferentes longitudes y radios.

* Por conveniencia se suelen representar los vientres y nodos del desplazamiento de las moléculas del material.

18. Música con una jeringa

Si se conocen las condiciones de resonancia de un tubo abierto por un extremo, es posible diseñar diversos tipos de instrumentos musicales.

¿Qué se necesita?

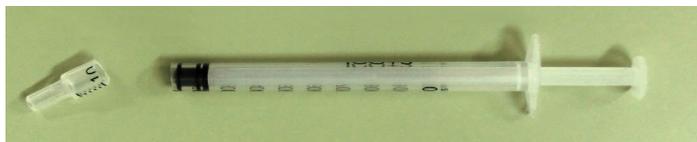


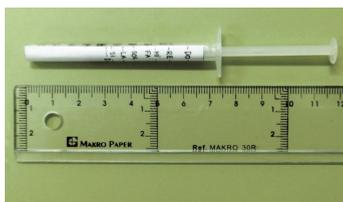
¿Qué hay que hacer?

La escala musical que conocemos consta de siete notas básicas. Una forma de relacionar las frecuencias de las notas adyacentes es mediante cocientes entre números enteros, tal como se muestra a continuación:

Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>do'</i>
Razón de frecuencias	8/9	9/10	15/16	8/9	9/10	8/9	15/16	

Desplaza un poco el émbolo y corta la jeringa con la cuchilla por su extremo abierto, de forma que quede un tubo de unos 7 cm de longitud.





Corta una tira de papel de la misma longitud que la jeringa y 1 cm de ancho, y haz una marca a 6,0 cm de un extremo. Asigna a dicha marca la nota *do*•, que será la más baja de la escala obtenida con la jeringa. Desde ese mismo extremo del papel, traza siete marcas a las siguientes distancias: 5,3 cm, 4,8 cm, 4,5 cm, 4,0 cm, 3,6 cm, 3,2 cm, y 3,0 cm. Estas marcas corresponden al resto de las notas de la misma octava más la nota *do*• de la siguiente octava.

Las razones entre las distancias de las marcas al borde del papel son las mismas que las razones entre las frecuencias de las notas musicales. Asigna a cada marca la correspondiente nota y coloca la tira sobre la jeringa, de forma que el borde de la jeringa y el extremo de la tira coincidan. Después sujeta el papel con cinta adhesiva.

Coloca el émbolo en la posición de una de las notas musicales, por ejemplo el *do*•. Sopla por el extremo libre de la jeringa. Mueve la posición del émbolo pasando por el resto de notas musicales.

¿Qué sucede?

Al soplar por el extremo libre de la jeringa, con el émbolo en las posiciones marcadas en el papel, se escuchan las diferentes notas musicales.

¿Cómo se explica?

La columna de aire contenida en un tubo puede vibrar longitudinalmente, y lo hace de diferente forma, según esté abierto por los dos extremos o solo por uno de ellos.

Si el tubo está cerrado solo por un extremo, habrá un vientre en el extremo abierto y un nodo en el cerrado. El sonido fundamental de dicho tubo se producirá para una longitud de onda, λ , que sea igual a cuatro veces la longitud, L , del tubo.*

Conocida la interdependencia de la frecuencia y la longitud del tubo, para dos tubos de longitudes L_1 y L_2 , se satisface la siguiente relación con sus correspondientes frecuencias, f_1 y f_2 :

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{f_2}{f_1}$$

* Véase la experiencia 17.

Sugerencias y comentarios

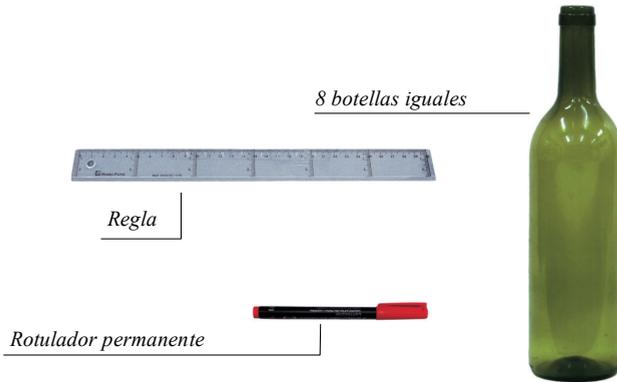
Intenta tocar una canción sencilla (*Cumpleaños feliz*, *Campanitas del lugar*, etc.).

La escala occidental consta de doce semitonos dentro de una octava: *do, do♯, re, re♯, mi, fa, fa♯, sol, sol♯, la, la♯, si*. Johann Sebastian Bach (1685-1750) propuso la escala temperada, en la cual la frecuencia de cada semitono se obtiene multiplicando por $\sqrt[12]{2}$ la frecuencia del semitono precedente.

19. Botellas musicales

Una botella abierta se comporta como un resonador de Helmholtz.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Toma una botella vacía y mide la longitud, L , y el diámetro interior, D , de su cuello, así como el volumen, V , hasta la base del cuello. Al sonido de esta botella le asignamos una nota, que será la más baja de la escala y que denominaremos do^\bullet .

Una botella típica de vino, como la que se muestra en la fotografía, tiene las siguientes dimensiones: altura $H = 30$ cm, volumen $V = 750$ cm³, longitud del cuello $L = 7,5$ cm y diámetro interior del cuello $D = 1,8$ cm. Con estas características, las botellas han de llenarse de agua hasta las alturas –medidas desde el fondo de la botella– que se indican a continuación para emitir el conjunto de notas de una octava (de esta particular escala musical etiquetada con el círculo negro):

Notas	do^\bullet	re^\bullet	mi^\bullet	fa^\bullet	sol^\bullet	la^\bullet	si^\bullet	$do^{\bullet\prime}$
Altura de agua (cm)	0,0	4,5	7,8	9,4	11,6	13,8	15,4	16,1

Con el rotulador, marca cada una de esas alturas en las respectivas botellas y etiqueta cada botella con el nombre de la nota correspondiente.

Pon agua en cada botella hasta la marca.



Sopla suavemente sobre las botellas, de una en una, comenzando por la vacía y en el orden de llenado.



¿Qué sucede?

Al soplar en las botellas se obtienen las diferentes notas musicales.

¿Cómo se explica?

La frecuencia del sonido emitido por una botella cuando se sopla en ella depende de la longitud L y la sección S de su cuello (que son fijas para las botellas idénticas de esta experiencia) y del volumen V de aire contenido en la botella (excluyendo su cuello), el cual depende de la altura del agua en el interior de la misma (ya que la sección es fija). La fórmula que da la frecuencia en función de las magnitudes anteriores es

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L \cdot V}}$$

donde v es la velocidad del sonido en el aire. Esta fórmula corresponde a un *resonador de Helmholtz*.*

Sugerencias y comentarios

Intenta construir escalas musicales con botellas de otras características (forma y tamaño) por el método de prueba y error, llenándolas con diferentes cantidades de agua y determinando la frecuencia mediante el programa *Audacity*.

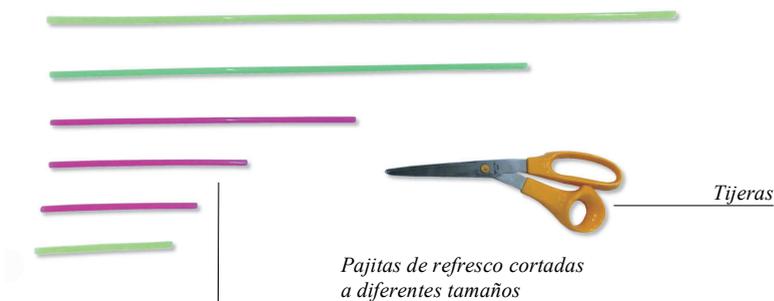
Si en lugar de soplar, golpeas las botellas, comprobarás que la frecuencia del sonido disminuye a medida que aumenta la cantidad de agua. Este comportamiento es justo el contrario de lo que sucedía en el experimento descrito en esta experiencia. Esto se debe a que los golpes hacen vibrar la botella y el agua que contiene, por lo que el aumento de masa implica una disminución de la frecuencia. En cambio, al soplar en las botellas vibra el aire de su interior y, cuanto más agua contengan, menor es el volumen de aire que puede vibrar. Por este motivo, cuando se sopla en la botella crece la frecuencia al aumentar la cantidad de agua.

* Hermann von Helmholtz (1821-1894).

20. Pajitas musicales

Oboe con pajitas de refresco.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Para que una pajita funcione como instrumento musical hay que hacerle una doble lengüeta. Para ello, realiza dos cortes biselados, de 1 cm aproximadamente.

Con los dientes aplasta la pajita por la base de la doble lengüeta (línea discontinua en la figura) hasta su extremo.

Introduce la pajita unos 2 o 3 cm en la boca, por el extremo de la lengüeta y, presionando suavemente con los labios, sopla con fuerza manteniendo el flujo de aire. No te desespere si no produces ningún sonido en el primer intento, pues se requiere cierta práctica.



¿Qué sucede?

Al soplar se escucha un sonido cuya frecuencia depende de la longitud de la pajita. El sonido será más agudo cuanto más corta sea la pajita.

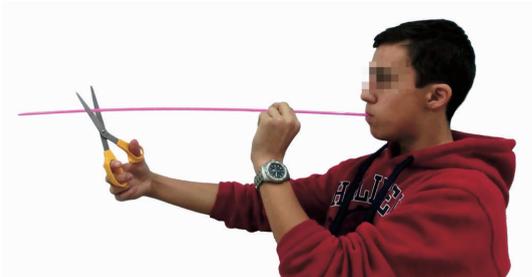
¿Cómo se explica?

Al soplar, la doble lengüeta vibra debido a una onda de presión que se propaga y retorna a través de la pajita (se crea una onda estacionaria). La longitud de onda del sonido aumenta con la longitud de la pajita, por lo que la frecuencia aumenta al disminuir su longitud.

Sugerencias y comentarios

Una forma alternativa de preparar el instrumento es, sin hacer los cortes, aplastar el extremo de la pajita con los dientes.

Haz sonar una pajita al tiempo que se va acortando su longitud con una tijera. Cuanto más larga sea la pajita, más amplia será la escala de sonidos que se puede obtener.



Introduce la pajita dentro de otra de mayor diámetro, la cual desplazará como si fuera un trombón de varas.

Haz un par de agujeros a lo largo de la pajita, como si fuera una flauta. Tapándolos y destapándolos obtendrás diferentes notas.

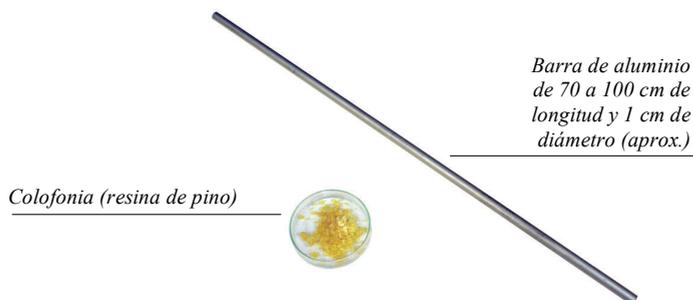
Son varios los instrumentos en los que el sonido se genera haciendo vibrar una lengüeta doble (oboe, fagot, dulzaina) o una simple (clarinete, saxofón).

Varias personas pueden interpretar una canción (sencilla) soplando por pajitas con la longitud adecuada para que emitan las notas de la escala musical.

21. Barra cantarina

Pueden producirse sonidos muy intensos frotando con los dedos barras o tubos metálicos.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Úntate los dedos índice y pulgar de una mano con colofonia.

Primer experimento

Con la otra mano sujeta la barra por su punto central con dos dedos. Desplaza los dedos untados en colofonia sobre la barra, desde el centro hasta uno de los extremos, con velocidad constante y ejerciendo una leve presión. Al llegar al extremo repite el proceso de forma regular. Se requiere cierta práctica para conseguir el efecto deseado.



Segundo experimento

Sujeta ahora la barra por un punto situado a una cuarta parte de la longitud de la barra. Desplaza los dedos untados en colofonia sobre la barra, desde el punto de sujeción hasta el extremo más alejado, con velocidad constante y ejerciendo una leve presión. Al llegar al extremo repite el proceso de forma regular.



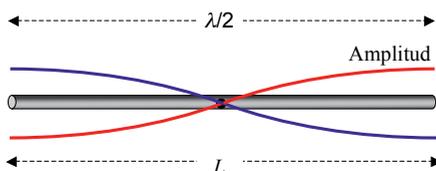
¿Qué sucede?

En el **primer experimento** se produce un sonido bastante intenso. El **segundo experimento**, que es más difícil de realizar, produce un sonido más agudo que en el primer caso.

¿Cómo se explica?

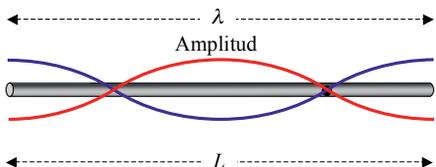
La resina aumenta la fricción entre los dedos y la barra, de tal manera que éstos se van deteniendo y deslizando (de manera imperceptible para el ojo humano) de la misma forma que cuando se deslizan los dedos humedecidos sobre una pandereta. La fricción de los dedos genera una vibración longitudinal en la barra. La amplitud de esta vibración aumenta si se mueven los dedos al ritmo adecuado, para conseguir que la barra entre en resonancia.

Si se sujeta una varilla por el centro y se hace vibrar longitudinalmente, el sonido fundamental se producirá con un nodo de desplazamiento en el centro y un vientre de desplazamiento en cada extremo. Por tanto, la longitud de onda, λ , será el doble de la longitud de la varilla, L .



Si se sujeta la varilla a una distancia $L/4$ de un extremo, el sonido fundamental se producirá con dos nodos –uno de ellos en el punto de sujeción– y tres vientres –dos de ellos en los extremos–. Por tanto, la longitud de onda, λ' , será igual a la longitud de la varilla, L .

Como $\lambda' < \lambda$ y las longitudes de onda son inversamente proporcionales a las frecuencias, se cumplirá que $f' > f$. En consecuencia, el sonido emitido es más agudo en el segundo caso que en el primero.



Sugerencias y comentarios

En las tiendas de bricolaje se consiguen barras de aluminio de 100 cm, que pueden acortarse a la longitud deseada.

Repite la experiencia con barras de diferente longitud. Cuanto más corta sea la barra, mayor será la frecuencia del sonido emitido.

Si consigues una barra de otro material (latón, cobre...), puedes comprobar cómo varía la frecuencia del sonido emitido para barras de la misma longitud.

Si sostienes la barra horizontalmente, puedes hacerla girar alrededor del eje vertical que pasa por su centro. El público que escuche el sonido notará el efecto Doppler al acercarse y alejarse el extremo de la barra.

Si apuntas con la barra hacia una persona, ésta notará un sonido más intenso que cuando la barra no apunta hacia ella. Así se pone de manifiesto el carácter longitudinal de la onda generada.

22. Guitarra con gomas

En una guitarra las notas más agudas se producen con las cuerdas más finas, más tensas o más cortas.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Coloca las gomas rodeando la caja de cartón. Con ayuda de dos lápices levanta las gomas formando un puente elástico entre ambos.



Primer experimento

Pulsa cada goma y compara los sonidos producidos.

Segundo experimento

Manteniendo la distancia entre los lápices igual a la del primer experimento, introduce el otro lápiz en el lateral de la caja, aumentando la tensión de las gomas. Compara los sonidos con los obtenidos en el primer experimento.

Tercer experimento

Retira el lápiz lateral y aproxima los otros lápices, acortando la distancia entre ellos. Vuelve a pulsar las gomas. Compara los sonidos con los obtenidos en el primer experimento.

¿Qué sucede?

En el **primer experimento**, al pulsar las gomas se van produciendo sonidos que son tanto más graves cuanto mayor es el grosor de la goma pulsada.

En el **segundo experimento**, los sonidos producidos al pulsar cada goma son ligeramente más agudos que los producidos en el primer experimento (apenas se percibe diferencia).

En el **tercer experimento**, los sonidos producidos al pulsar cada goma son claramente más agudos que los obtenidos respectivamente en el primer experimento.

¿Cómo se explica?

Al pulsar una goma se la hace vibrar, produciéndose un sonido cuya frecuencia depende del grosor, de la longitud y de la tensión de la goma.

Cuanto más gruesa es la goma, mayor masa tiene y la vibración es más lenta, por lo que la frecuencia disminuye y el sonido se hace más grave. Por eso, a igualdad de longitud y tensión, las gomas de mayor grosor producen sonidos más graves.

Cuanto mayor es la tensión de la goma, la vibración es más rápida, por lo que la frecuencia aumenta y el sonido se hace más agudo. Por eso, a igualdad de grosor y longitud, las gomas de mayor tensión producen sonidos más agudos.

Cuanto menor es la longitud de la goma, la vibración es más rápida, por lo que la frecuencia aumenta y el sonido se hace más agudo. Por eso, a igualdad de grosor y tensión, las gomas de menor longitud producen sonidos más agudos.

Estos comportamientos se recogen en la ecuación de Mersenne: *

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\tau}{w}}$$

que establece la dependencia de la frecuencia, f , con la longitud, L , la tensión, τ y la densidad lineal de masa, w , de la cuerda.

Los lápices sobre los que se apoyan las gomas actúan como el puente de una guitarra. Su función es transmitir la vibración de las gomas a la caja de cartón, que actúa como caja de resonancia.

Sugerencias y comentarios

Repita el experimento con una caja de cartón en la que se ha efectuado un abertura circular en la cara donde están los dos lápices.

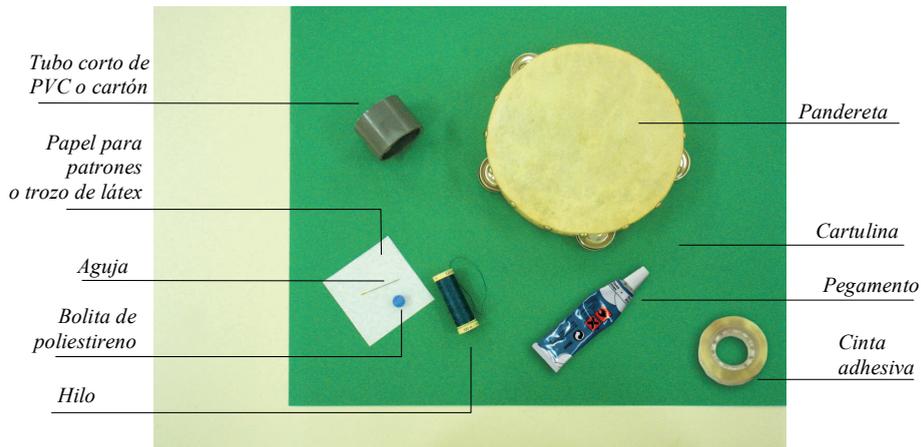
También puedes emplear cajas de diferentes tamaños, formas y materiales (madera, plástico, cartón...) para comprobar cómo varía el sonido que emiten.

* Marin Mersenne (1588-1648).

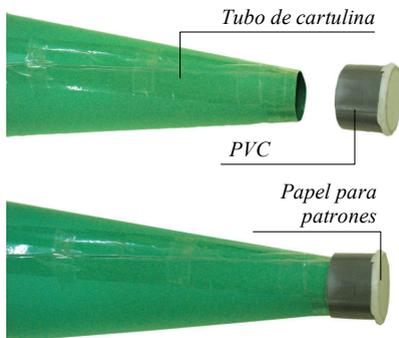
23. Un oído artificial

Una bocina de cartulina, tapada en su extremo más estrecho con una delgada hoja de papel, ayuda a entender la recepción del sonido por el oído.

¿Qué se necesita?



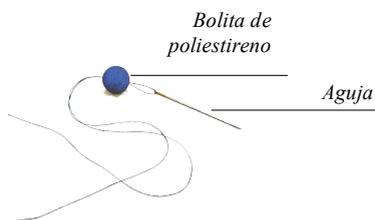
¿Qué hay que hacer?



Haz un cono de cartulina y fíjalo con cinta adhesiva. Corta el extremo puntiagudo del cono dejando una abertura circular de unos 4 cm.

Pega un pequeño trozo circular de papel para patrones (o de fumar) sobre un tubo corto de PVC o cartón.

Encaja el tubo en el extremo estrecho del cono.

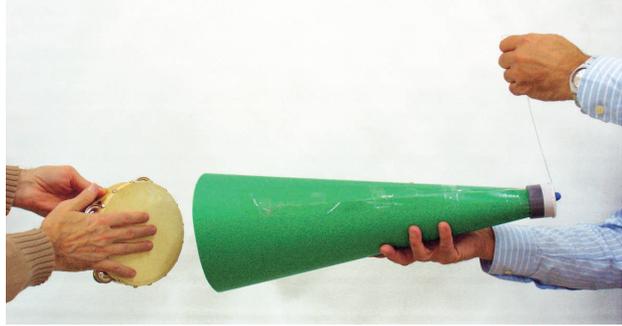


Toma una bolita de poliestireno de 1 cm de diámetro y, con ayuda de una aguja, atraviésala con un hilo. Haz un nudo en el hilo para que la bola quede sujeta.

¿Qué sucede?

Una persona sujeta horizontalmente el cono y el hilo con la bolita, de modo que ésta toque levemente el pequeño trozo de papel.

Cuando otra persona hace sonar la pandereta frente a la abertura grande del cono, la bolita efectúa pequeños saltos.



¿Cómo se explica?

Las ondas sonoras son ondas de presión que se propagan por el aire. Estas ondas son recogidas por el cono (que hace la función de pabellón auditivo) y dirigidas hacia el trozo de papel. Este papel vibra al recibir las ondas sonoras y transmite la vibración a la bolita. El papel actúa como el tímpano, cuando transmite la vibración a la cadena de huesos.

Sugerencias y comentarios

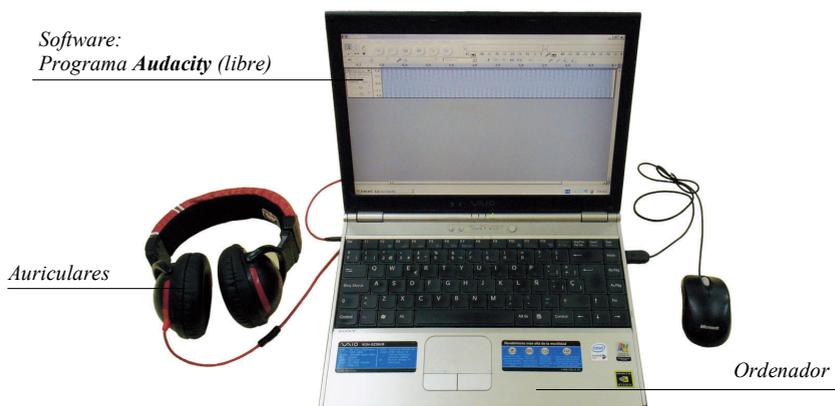
Pueden obtenerse resultados parecidos golpeando, en vez de la pandereta, la tapa de una caja de folios o hablando con voz bastante alta.

También se puede colocar el cono frente a un equipo de música y observar cómo la bolita salta al ritmo de la canción que suena.

24. Audiometría casera

El intervalo de frecuencias audibles por el oído humano está comprendido aproximadamente entre 20 Hz y 20000 Hz. Este rango varía con la persona y, sobre todo, con la edad.

¿Qué se necesita?



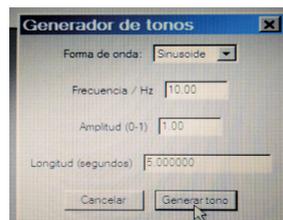
¿Qué hay que hacer?

La persona objeto de la audiometría se coloca los auriculares.
Conecta los auriculares a la salida de audio del ordenador.
Abre el programa *Audacity*.

En la barra de menús marca *Generar* y selecciona *Tono*.



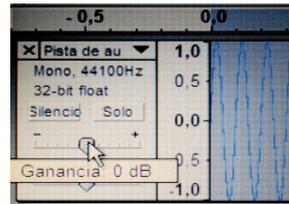
Pulsa en *Tono* y abre el cuadro de diálogo *Generador de tonos*.
En *Forma de onda* selecciona “Sinusoide”.
En *Frecuencia / Hz* selecciona “10.00”.
En *Amplitud (0-1)* selecciona “1.00”.
En *Longitud (segundos)* selecciona “5.000000”.



Coloca el cursor del “altavoz” en el punto medio.



Coloca el cursor de “ganancia” en 0 dB.



Coloca el cursor de “estéreo” en el punto medio.



Pulsa el botón de “reproducir”.

Realiza las pruebas para las sucesivas frecuencias volviendo al cuadro de diálogo *Generador de tonos* y selecciona, en *Frecuencia/Hz*, las frecuencias escogidas.



¿Qué sucede?

Se comienza por una frecuencia de 10 Hz y se realiza la audición. Si la persona no escucha el sonido, se incrementa la frecuencia –que puede hacerse a intervalos de 5 Hz– y se efectúa una nueva audición. El proceso se repite hasta que la persona escuche el sonido de una cierta frecuencia. Esa frecuencia es su *umbral inferior de audición*.

Se selecciona una frecuencia de 10000 Hz y se realiza la audición. Si la persona escucha el sonido, se incrementa la frecuencia –que puede hacerse a intervalos de 1000 Hz– hasta que la persona deje de escuchar el sonido para una cierta frecuencia. Esta frecuencia es su *umbral superior de audición*.

¿Cómo se explica?

El tímpano es una membrana sensible a las frecuencias comprendidas en un determinado intervalo, que depende de la flexibilidad de dicha membrana.

La flexibilidad depende de cada persona y se va reduciendo con la edad, lo que afecta sobre todo a las frecuencias altas (reducción del *umbral superior de audición*).

Sugerencias y comentarios

El barrido de frecuencias para hallar los umbrales inferior y superior de audición puede realizarse a intervalos más pequeños.

La audiometría puede realizarse separadamente para los oídos izquierdo y derecho, haciendo uso del cursor de “estéreo”.

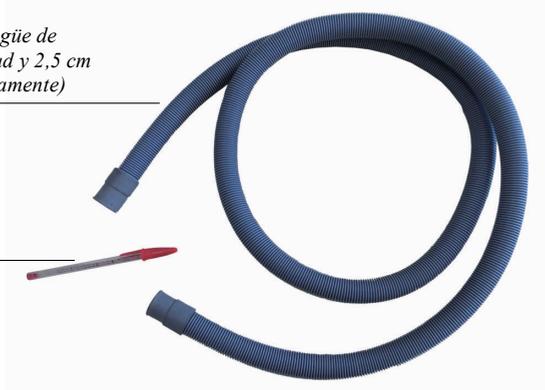
25. Audición binaural

Con un solo oído no se puede determinar el origen de un sonido.

¿Qué se necesita?

Tubo corrugado de desagüe de lavadora (2 m de longitud y 2,5 cm de diámetro, aproximadamente)

Bolígrafo



¿Qué hay que hacer?



Primer experimento

Una persona coloca un extremo del tubo en contacto con uno de sus oídos y mantiene el extremo opuesto separado del otro oído.

Una segunda persona golpea con el lápiz en distintas posiciones del tubo.



Segundo experimento

Una persona coloca los dos extremos del tubo en contacto con sus oídos. La otra persona golpea con el lápiz en distintas posiciones del tubo.

Tercer experimento

Con la disposición del segundo experimento, se arrastra el lápiz a lo largo del tubo, desde un oído hasta el otro.

¿Qué sucede?

En el **primer experimento**, el oyente no es capaz de distinguir en qué parte del tubo se está golpeando con el lápiz.

En el **segundo experimento**, el oyente distingue en qué parte del tubo se golpea con el lápiz.

En el **tercer experimento**, al desplazar el lápiz a lo largo del tubo, el oyente tiene la impresión de que el ruido originado por el lápiz viaja de un oído a otro.

¿Cómo se explica?

Dependiendo de la posición del lugar en que se origina el sonido respecto de los oídos, la intensidad sonora que llega a cada uno de ellos es distinta, siendo menor cuanto más lejos esté el foco sonoro. Esta diferencia de intensidad, procesada por el cerebro, permite situar el origen del sonido.

Sugerencias y comentarios

Este fenómeno está relacionado con la audición en estéreo.

Observa los pabellones auditivos de diferentes animales (el ser humano entre ellos) y verás que tienen diferentes diseños. Algunos son lisos y pueden orientarse sin mover la cabeza, otros tienen pliegues y no pueden moverse, etc.

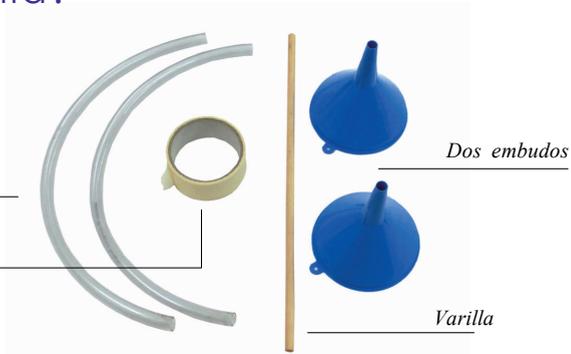
26. Topófono engañoso

Podemos engañar al oído respecto a la procedencia de un sonido.

¿Qué se necesita?

*Dos tubos de vinilo de
50 cm de longitud*

Cinta de papel



¿Qué hay que hacer?

Introduce cada embudo en el extremo de uno de los tubos de vinilo. Asegura el conjunto a la varilla con cinta de papel, de modo que el extremo de cada tubo quede libre.



Una persona introduce suavemente en sus oídos los extremos libres de los tubos de vinilo y cierra los ojos.



Una segunda persona se coloca a un lado de la primera, cerca de un embudo (posición *A*), comienza a hablar y, sin dejar de hacerlo, se desplaza por detrás de la persona que sostiene los tubos, hasta situarse cerca del segundo embudo (posición *B*).

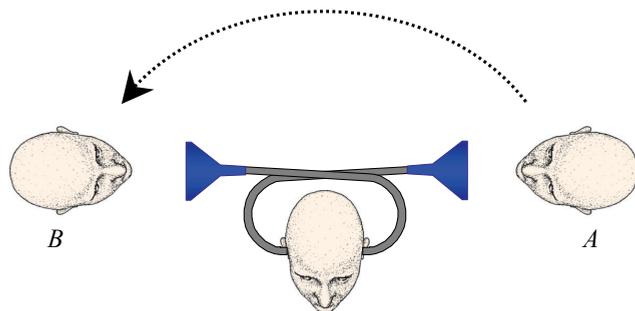


¿Qué sucede?

Mientras la persona que habla se desplaza desde la posición *A* hasta la *B*, la persona que escucha con el aparato percibe que el desplazamiento tiene lugar en sentido contrario, desde *B* hasta *A*.

¿Cómo se explica?

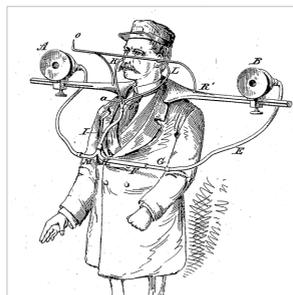
El sonido percibido en el oído derecho procede del que se origina frente al embudo izquierdo, y el que llega al oído izquierdo procede del originado frente al embudo derecho. El resultado es una falsa ubicación de la fuente sonora.



Sugerencias y comentarios

El *topófono* fue un aparato patentado en 1880 por Alfred M. Mayer (1836-1897), ideado para que los capitanes de barco pudieran localizar la sirena de un navío, de noche o con niebla. Durante el siglo XX, antes del descubrimiento del radar, se utilizaron aparatos, basados en el mismo fundamento, para la detección de aviones.

El topófono se diseñó para localizar mejor la procedencia del sonido, no para confundir sobre la procedencia del mismo, que es el objetivo de este “topófono engañoso”.



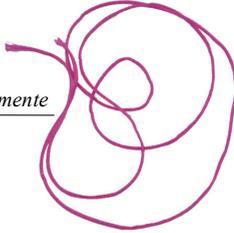
El *topófono*, como aparece en la patente US 224199 (1880).

27. Las campanadas

Los sólidos son excelentes medios para la propagación del sonido.

¿Qué se necesita?

Trozo de cordel
de 1 m aproximadamente



Cuchara metálica

¿Qué hay que hacer?



Ata la cuchara con el cordel, sujetando éste con los dedos índice y pulgar de cada mano, de forma que el cordel quede sobre el dedo pulgar.



Introduce firmemente los pulgares en los oídos, de modo que la cuchara quede colgando. Asegúrate de que el cordel quede bien apretado entre los pulgares y los oídos. Golpea la cuchara contra el borde de una mesa.

¿Qué sucede?

Al golpear la cuchara con la mesa se escucha un sonido (habitualmente grave) que recuerda al de las campanas de una iglesia.

¿Cómo se explica?

Las ondas sonoras se propagan mejor por los sólidos que por el aire. Al golpear la cuchara, ésta vibra y emite sonido, pero las notas graves se atenúan en el aire más fácilmente que en un sólido. Esto explica que el sonido que llega al oído a través del cordel tenso sea más intenso y más grave que el que se escucha directamente procedente de la cuchara. Además, los huesos de la cabeza actúan como una caja resonante y también vibran, ayudando a que el sonido suene más intenso.

Sugerencias y comentarios

Prueba con hilos y cordeles de diferentes materiales y grosores. La experiencia funciona mejor cuando el cordel está tenso, por lo que conviene que la cuchara sea pesada y que el cordel no sea muy rígido.

Prueba a hablar tapándote los oídos. Notarás tu voz diferente (más grave), pues de esta forma no recibes el sonido desde el aire sino a través de los huesos de la mandíbula y el cráneo. Esto explica por qué te cuesta reconocer tu voz grabada, que suele sonar más aguda.

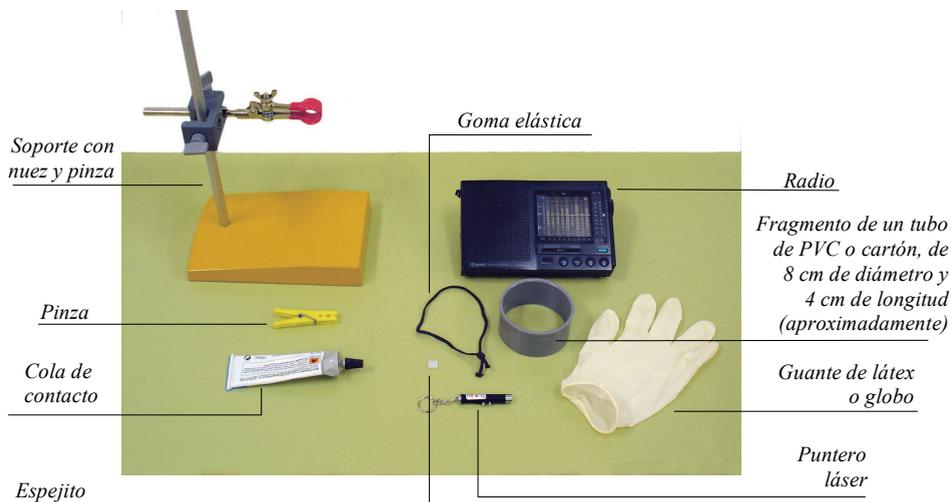
Ata un extremo del cordel al pomo de una puerta (u otro lugar similar) y enrolla el otro extremo en un dedo. Si haces vibrar el cordel cuando está tenso, apenas notarás sonido. Pero si te colocas el dedo en el oído, tal como se ha explicado al principio de la experiencia, notarás perfectamente el sonido producido por la vibración. Este sonido será más o menos intenso cuanto más o menos tenso esté el cordel.

Ahora ata dos trozos de cordel al extremo de un *slinky* metálico, déjalo que cuelgue libremente y colócate los cordeles en los oídos. Si le pides a alguien que desplace ligeramente el *slinky* en sentido vertical y lo suelte percibirás un sonido metálico que se parece al disparo de un “arma futurista”.

28. Viendo el sonido

La luz de un láser puede "dibujar" un sonido.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Corta un trozo de látex del guante (o globo), de mayor superficie que la sección del tubo, que actuará de membrana.

Fija la membrana al tubo con ayuda de la goma elástica. Pega con cola de contacto el espejito en el centro de la membrana (ten cuidado, pues algunos pegamentos de contacto degradan el látex).

Coloca el tubo con la membrana encima del altavoz de la radio.

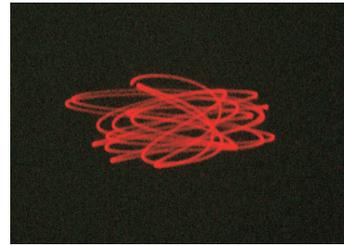
Monta el puntero láser en el soporte y enciéndelo con ayuda de la pinza, de modo que la luz se refleje en el espejo y se proyecte en el techo.

Sintoniza una emisora con música y sube el volumen del aparato.



¿Qué sucede?

En el techo se observan figuras luminosas que siguen el ritmo de la música



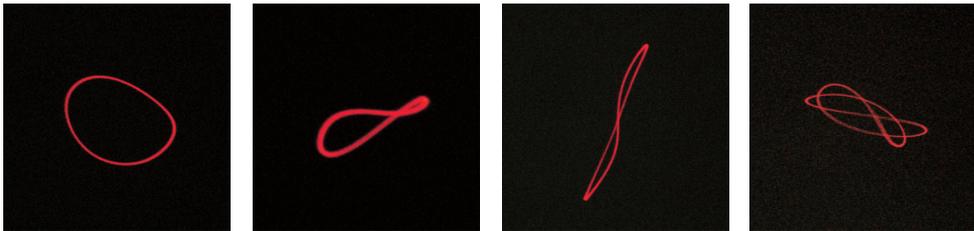
¿Cómo se explica?

Las ondas sonoras del altavoz hacen vibrar la membrana elástica, lo que provoca el desplazamiento del espejo.

La luz láser reflejada en dicho espejo cambia continuamente de dirección y traza en el techo figuras que, en ocasiones, recuerdan las *figuras de Lissajous*.*

Sugerencias y comentarios

Con un generador de frecuencias conectado a un altavoz, sobre el que se sitúa el tubo con la membrana, pueden conseguirse figuras estables para determinadas frecuencias. Si se modifican las dimensiones (longitud y diámetro) del tubo, o cambia la tensión de la membrana, variarán las frecuencias para las que se obtienen figuras estables.



También se pueden observar las diferentes formas de las figuras correspondientes a la pronunciación de cada una de las vocales.

* Jules Antoine Lissajous (1822-1880).

Ver

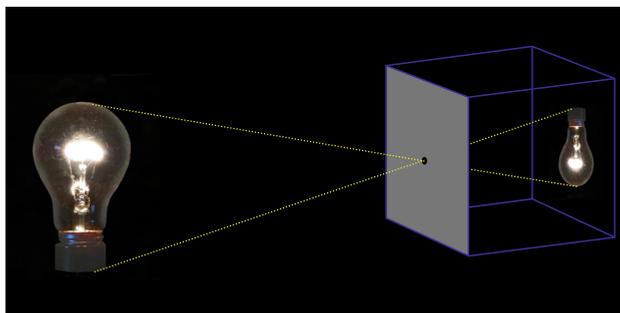


¿Qué sucede?

Observarás una imagen del objeto proyectada en el plástico que actúa de pantalla. Esta imagen es real e invertida, tanto vertical como horizontalmente. Su tamaño será mayor (menor) que el objeto si la distancia desde el orificio a la pantalla es mayor (menor) que la distancia desde el orificio al objeto.

¿Cómo se explica?

La luz se propaga en línea recta en un medio homogéneo. Debido a esta propiedad, si en una caja se realiza un pequeño orificio y frente a él se sitúa un objeto bien iluminado, la luz procedente de cada punto del objeto pasará a través del orificio y se proyectará en un único punto de la superficie opuesta, dando lugar a una imagen invertida.



Sugerencias y comentarios

En el mundo de la fotografía el orificio por el que entra la luz en una cámara también se llama *diafragma*. Si aumenta su diámetro la imagen es más luminosa, pero menos nítida, ya que la calidad de la imagen disminuye al aumentar el diámetro del diafragma. La experiencia 58 explica cómo un pequeño orificio ayuda a las personas miopes a ver con más nitidez.

Para obtener cuadros más realistas, la cámara oscura ha sido empleada con profusión en pintura, sustituyendo el orificio por una lente para mejorar la calidad de la imagen. Dos usuarios destacados fueron Leonardo da Vinci (1452-1519) y Johannes Vermeer (1632-1675).

La cámara oscura puede considerarse como un precursor de la cámara fotográfica. De hecho, la palabra “cámara” procede de las habitaciones o cámaras en las que se proyectaban imágenes a través de un orificio que conectaba la habitación con el exterior. En la actualidad, hay cámaras oscuras que funcionan como atracción turística en varias ciudades.

Un observador atrevido puede introducirse dentro de una cámara fabricada con una caja grande (de electrodomésticos, como un frigorífico) y salir a la calle a observar paisajes o escenas callejeras proyectadas en la pared interior de la caja.

30. Reflexión de la luz

Con un espejo puede cambiarse la dirección de propagación de la luz.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Pon el espejo (con su cara reflectante hacia arriba) en el fondo del vaso. Llénelo con agua y añade unas pocas gotas de leche para que el agua se vuelva levemente turbia. Finalmente, dirige hacia el espejo el rayo de luz que emite el puntero láser, apuntando con cierta inclinación hacia la superficie del agua.

¿Qué sucede?

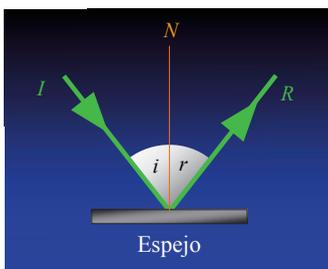
La turbidez del agua hace visible la trayectoria de la luz. El rayo de luz incidente en el espejo y el rayo reflejado son simétricos respecto de la perpendicular al espejo, formando una V.



¿Cómo se explica?

Cuando la luz que se propaga en un medio incide sobre un espejo vuelve al mismo medio. Este fenómeno se conoce como *reflexión*.

El ángulo i , que forma el rayo incidente I con la perpendicular a la superficie del espejo en el punto de incidencia de la luz, llamada *normal* N , es igual al ángulo r , que forma el rayo reflejado R con dicha normal. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano.



Sugerencias y comentarios

Repita el experimento con diferentes ángulos de incidencia del rayo de luz sobre la superficie del agua.

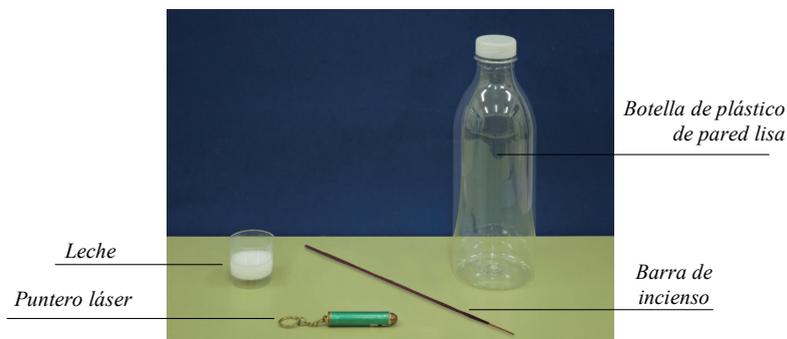
Conviene destacar que si no se hubiera añadido leche al agua, no se observaría la trayectoria del haz de luz, pues ésta no llegaría hasta nuestros ojos si no se dispersara en las partículas que hay en el agua.

Para visualizar la trayectoria del rayo de luz, también se podría llenar el vaso con humo procedente de la combustión de una varilla de incienso.

31. Refracción de la luz

La luz no se propaga en línea recta cuando cambia de medio de propagación.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Pon agua en la botella hasta algo más de la mitad y añade unas gotas de leche para que el agua adquiera una leve turbidez.

Enciende la barrita de incienso, introdúcela por la boca de la botella y mantenla durante medio minuto aproximadamente. Después sácala y cierra la botella.



Primer experimento
Dirige el puntero láser de modo que la luz pase del aire al agua.



Segundo experimento
Dirige el puntero láser de modo que la luz pase del agua al aire.
Tanto en el primer experimento como en el segundo, conviene que haya cierta oscuridad ambiente.

¿Qué sucede?

En el **primer experimento**, la presencia del humo hace visible la trayectoria de la luz a través del aire. Cuando el rayo pasa del aire al agua se acerca a la perpendicular a la superficie del agua en el punto de incidencia de la luz, llamada *normal*, N .

En el **segundo experimento**, el rayo de luz se aleja de la normal cuando pasa del agua al aire.

¿Cómo se explica?

La luz se propaga en el vacío (y prácticamente en el aire) a una velocidad $c \approx 3,0 \times 10^8$ m/s. En cualquier otro medio la velocidad de propagación, v , siempre es menor. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en otro medio se llama *índice de refracción*, n ,

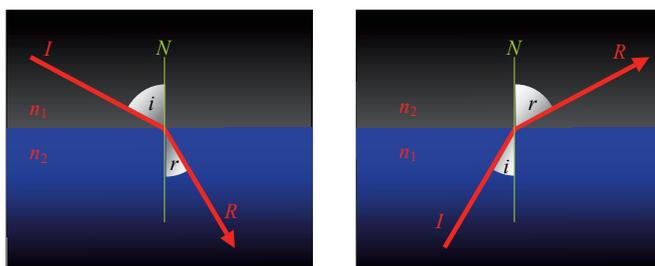
$$n = \frac{c}{v}$$

Cuanto mayor es el índice de refracción de una sustancia, más lenta es la propagación de la luz a través de ella.

Cuando la luz pasa de un medio a otro con diferente velocidad de propagación, cambia de dirección. Este fenómeno se llama *refracción*.

Para describir la propagación de un rayo de luz que pasa de un medio a otro diferente (véanse las figuras) conviene considerar los siguientes elementos:

- Índice de refracción del primero y segundo medio, n_1 y n_2 , respectivamente.
- Rayo incidente, I .
- Rayo refractado, R .



En la figura izquierda se observa que cuando un rayo de luz, I , pasa de un medio, en el que se propaga a más velocidad, a otro en el que lo hace a menos velocidad (por tanto, $n_1 < n_2$), el rayo refractado, R , se acerca a la normal, N .

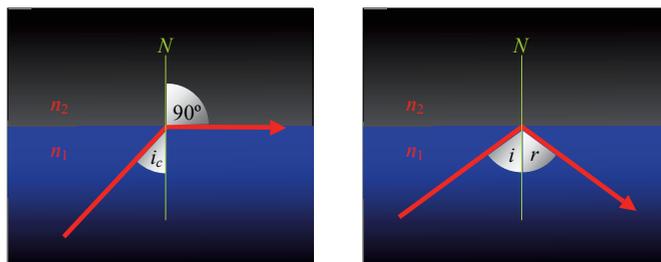
En la figura derecha se observa que cuando un rayo de luz, I , pasa de un medio, en el que se propaga a menos velocidad, a otro en el que lo hace a más velocidad (por tanto, $n_1 > n_2$), el rayo refractado, R , se aleja de la normal, N .*

* La refracción cumple la *ley de Snell*, $n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$, donde i y r son, respectivamente, los ángulos que forman el rayo incidente y el rayo reflejado con la normal, N . Esta ley fue enunciada en 1621 por Willebrord Snel von Royen (1580-1626).

Sugerencias y comentarios



Observa que cuando la luz pasa del agua al aire ($n_1 > n_2$), para un ángulo de incidencia determinado, $i_c = \arcsen(n_2 / n_1)$, la luz se refracta formando un ángulo de 90° respecto de la normal, por lo que no pasa al otro medio; si $i > i_c$, la luz se refleja y vuelve al medio de donde procede. Este fenómeno se conoce como *reflexión interna total* y es el fundamento de las fibras ópticas. El ángulo i_c se denomina ángulo de *reflexión interna total*.

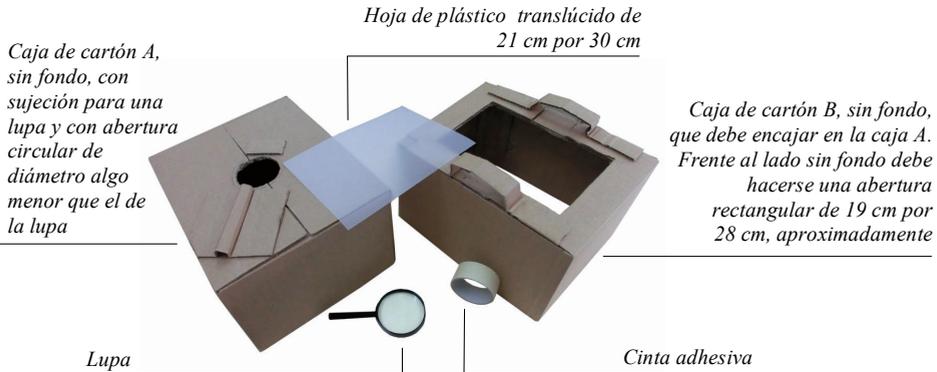


Habrás observado este fenómeno en lámparas decorativas formadas por multitud de filamentos cuyos extremos están iluminados porque por su interior conducen la luz que reciben por el otro extremo. La reflexión interna total también es responsable de los fascinantes destellos de un diamante tallado.

32. Imágenes con lentes

Una lente común sirve para producir imágenes de una calidad aceptable.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Coloca la lente en la apertura de la caja A.

Fija con cinta adhesiva la hoja de plástico translúcido en la apertura rectangular de la caja B.

Introduce la caja B en la caja A.



Orienta la caja A hacia un lugar bien iluminado.

Desplaza suavemente la caja B en el interior de la caja A hasta ver en la lámina de plástico una imagen nítida del objeto observado, que puede ser un paisaje, una figura iluminada...



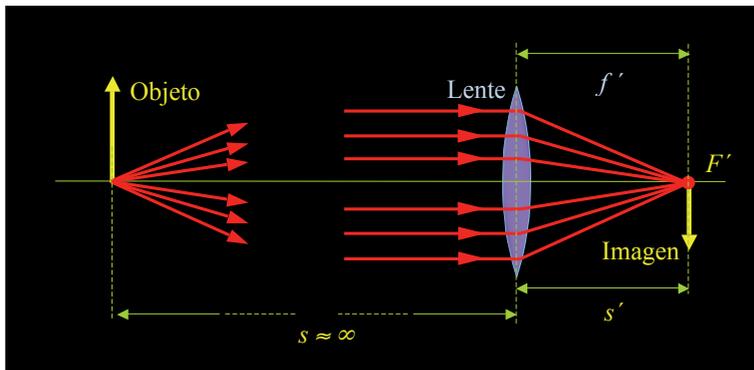
¿Qué sucede?

Sobre la hoja de plástico se forma una imagen real, invertida y de menor tamaño que el objeto. Cuando el objeto se encuentra muy distante de la lente, la distancia desde ésta hasta la hoja se denomina *distancia focal*, f' , y es un parámetro característico de la lente.

¿Cómo se explica?

Una lente es un medio transparente limitado por dos superficies, una de las cuales, al menos, es curva. Cuando una lente es más gruesa por el centro que por los bordes –como es el caso de la lupa– se dice que es *convergente*. Esto se debe a que, cuando un haz de rayos paralelos llega a una lente de este tipo, todos estos convergen en un punto F' , que se llama *foco imagen*. Si se considera una lente suficientemente delgada, con dos caras de igual curvatura, la distancia desde el centro de la lente hasta F' es la *distancia focal imagen*, f' .

Cuando un objeto se encuentra frente a una lente convergente, a una distancia s mucho mayor que la distancia focal, los rayos de luz procedentes de cada punto del objeto llegan a la lente prácticamente paralelos y convergen a una distancia s' que es igual a f' . La imagen obtenida es real, invertida y menor que el objeto. En estas condiciones, la distancia medida desde la lente hasta la hoja translúcida en la que se forma la imagen es la distancia focal.



Sugerencias y comentarios

Examina la imagen de objetos situados a diferentes distancias y observa cómo son las distancias a las que debe hallarse la pantalla de plástico translúcido en cada caso. Para mejorar el contraste de la imagen, puedes cubrir la pantalla de plástico y tu cabeza con una toalla (u otra tela opaca), como hacían los antiguos fotógrafos.

Puedes simplificar el montaje anterior y sostener la lupa con una mano para proyectar la imagen de una ventana (o un televisor) sobre una hoja de papel o plástico translúcido, sostenida con la otra mano.

33. Difracción de la luz

Cuando la luz emerge por una abertura estrecha se desvía hacia la zona que debería ocupar la sombra geométrica.

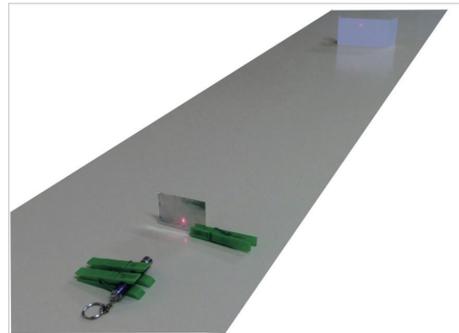
¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Realiza con la aguja un agujero en la lámina de aluminio, sosteniéndola sobre el tapón.



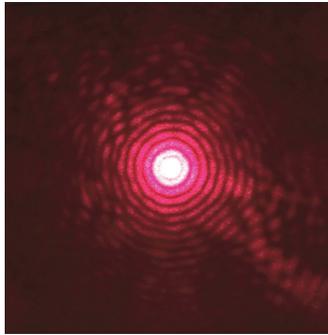
Con dos pinzas coloca horizontalmente el puntero láser sobre una mesa. Una de las pinzas sirve para oprimir el pulsador.

Orienta después el haz de luz hacia el agujero de la lámina de aluminio, que sujetarás con otra pinza.

La luz deberá incidir finalmente sobre la pieza de cartulina, situada a algo más de un metro del aluminio.

¿Qué sucede?

Sobre la cartulina aparece una mancha central luminosa, rodeada de anillos concéntricos, alternativamente claros y oscuros; la imagen se observará mejor si hay oscuridad en la habitación donde se realiza la experiencia.



¿Cómo se explica?

Según la óptica geométrica, al interponer el borde de un objeto opaco entre una fuente luminosa y una pantalla debería observarse una sombra nítida. Según esto, la luz que pasa a través de un orificio circular produciría una mancha circular nítida, del mismo diámetro que el orificio. Sin embargo, y dado el carácter ondulatorio de la luz, cada punto del orificio circular se convierte en un centro emisor de nuevos frentes de ondas esféricas. Esto da lugar a que la luz que emerge del orificio “invada” la zona de sombra. Este fenómeno se conoce como *difracción* de la luz.

Además, como entre las diferentes ondas secundarias (procedentes de la periferia del orificio) que llegan a cada punto de la pantalla existen diferencias de fase, esas ondas interfieren creando regiones circulares de máxima y mínima intensidad.

Sugerencias y comentarios

Observa cómo varía la separación entre los anillos concéntricos que se forman en la pantalla cuando se realiza el experimento con orificios de diferente diámetro. También puedes realizar la experiencia con láseres de diferente longitud de onda. Verás que las separaciones entre los anillos disminuye si aumenta el diámetro del orificio o disminuye la longitud de onda del láser.

Si reemplazas el orificio circular por un obstáculo circular (puede servir la cabeza esférica de un alfiler como los empleados para plegar las camisas), observarás igualmente anillos luminosos concéntricos separados por zonas oscuras.

Examina también la difracción e interferencias que se producen interponiendo en el haz del láser un cabello humano.

34. Polarización de la luz

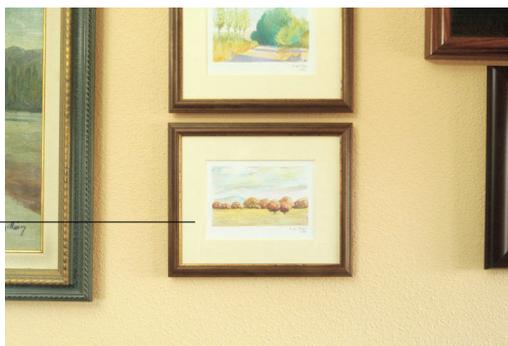
El ojo humano no es capaz de apreciar las diferencias entre la luz incidente y reflejada en una superficie lisa.

¿Qué se necesita?

Gafas de sol polarizadas



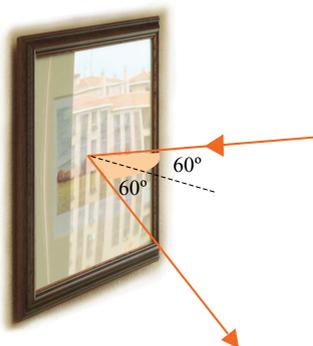
Superficie lisa brillante (vidrio de cuadro, escaparate, charco de agua, etc.)



¿Qué hay que hacer?

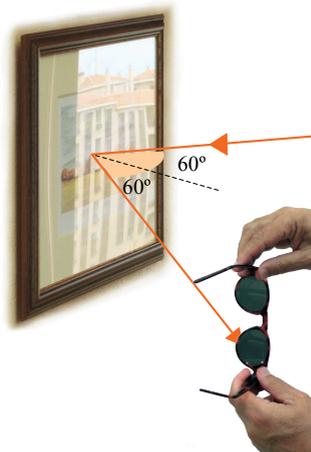
Caso 1

Observa la superficie en que incide la luz, con una orientación próxima a la que se muestra en la imagen.



Caso 2

Repite la observación a través de las gafas polarizadas, orientadas verticalmente.



¿Qué sucede?

En el **caso 1**, se observan los reflejos de los objetos del entorno. Estos reflejos impiden ver con claridad lo que hay detrás del vidrio.



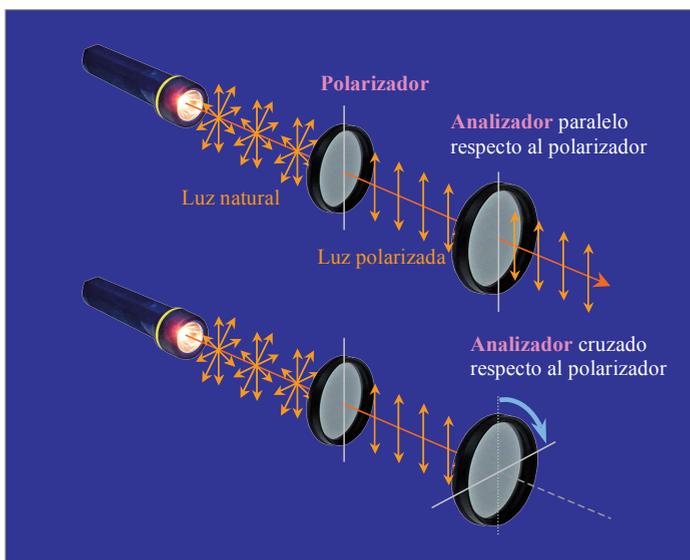
En el **caso 2**, la mayor parte de los reflejos desaparecen, lo que permite ver más claramente lo que hay detrás del vidrio.



¿Cómo se explica?

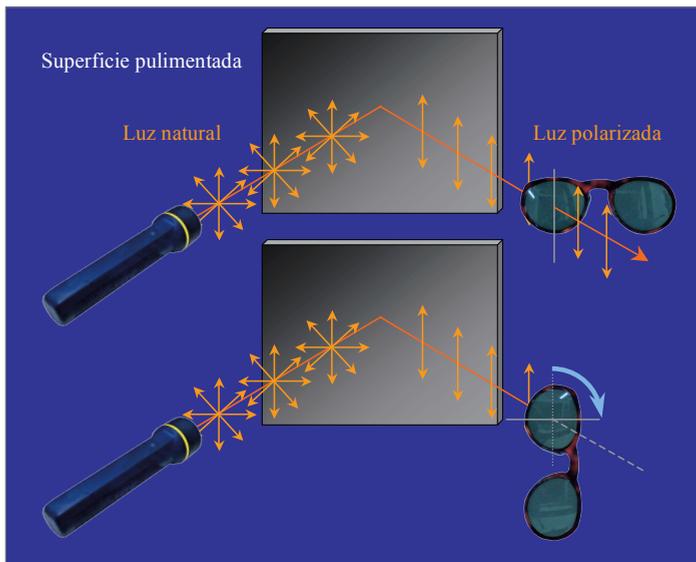
La luz natural es radiación electromagnética que vibra en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación. Mediante algunos dispositivos (*polarizadores*) se puede conseguir que la luz vibre en una sola dirección. Se habla entonces de luz polarizada.

El ojo humano no es capaz de reconocer esta característica de la luz. Sin embargo, si la luz polarizada se examina con otro polarizador (llamado ahora *analizador*) que esté orientado igual que el primero, la luz llega al ojo. Por el contrario, si el analizador se orienta perpendicularmente al polarizador la luz queda bloqueada.



Cuando la luz natural incide con un determinado ángulo sobre una superficie pulimentada, se refleja con su plano de polarización paralelo al plano de la superficie; éste se denomina *ángulo de Brewster* * y vale $i_B = \arctan(n_2/n_1)$, donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios de donde procede la luz y de donde se refleja. Si esta luz reflejada se observa con un analizador orientado adecuadamente se puede bloquear.

Los cristales de algunas gafas de sol son polarizadores, por tanto son útiles para eliminar reflejos molestos cuando éstos provienen de luz polarizada. La dirección de polarización de los cristales de las gafas es perpendicular a la montura, para reducir el brillo procedente de los reflejos que se producen en el suelo, principalmente.



Sugerencias y comentarios

Puede percibirse el efecto de las gafas polarizadas cuando se observan los brillos que se producen en las calles, carreteras, superficies metalizadas (como las de los coches), charcos de agua, etc.

Si colocamos ante nuestros ojos dos gafas polarizadas (o los dos cristales de las mismas gafas), se puede variar su orientación relativa para observar que la luz transmitida es máxima cuando la orientación de ambas coincide, mientras que apenas se transmite luz cuando ambos cristales están orientados perpendicularmente.

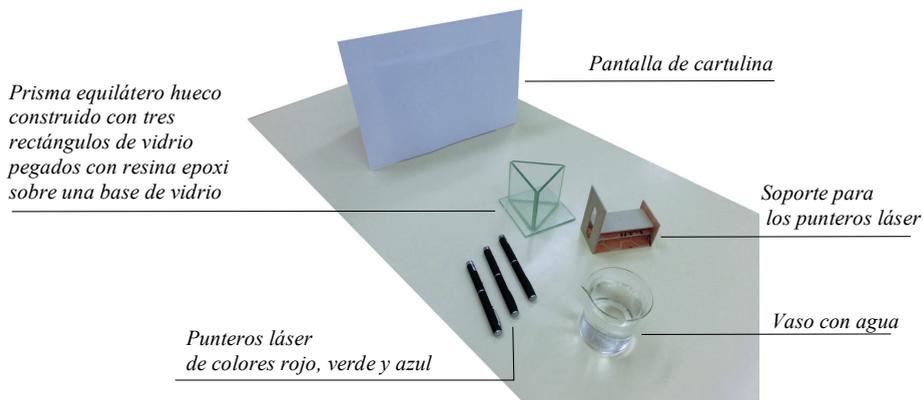
En fotografía se usan con profusión los filtros polarizadores para realzar las imágenes, aumentando el contraste cuando en la escena hay superficies reflectantes o aparece el cielo (cuya luz también está parcialmente polarizada).

* David Brewster (1781-1868).

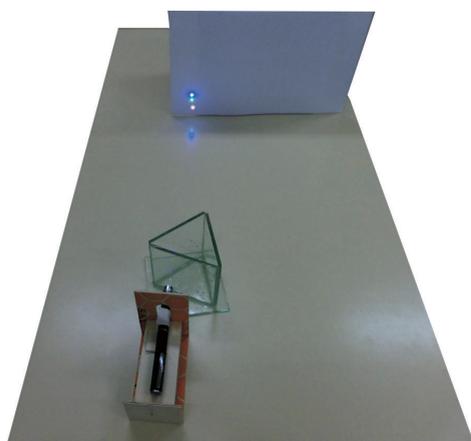
35. Desviando colores con un prisma de agua

La desviación de una luz monocromática por un prisma de agua depende del color de la luz

¿Qué se necesita?

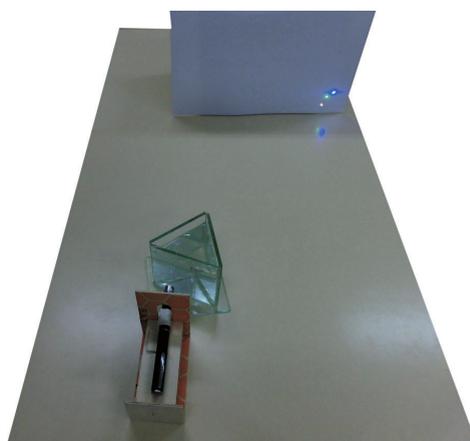


¿Qué hay que hacer?



Caso 1

Apoya horizontalmente los punteros, uno encima de otro, sobre el soporte. Dirige las luces hacia el prisma vacío y observa las tres señales luminosas sobre la pantalla. Las tres señales deben estar situadas en la misma vertical.



Caso 2

Llena el prisma con agua hasta que el nivel esté por encima de las trayectorias de los rayos. Los rayos luminosos se han de recoger sobre la pantalla, por lo que habrá que desplazar ésta si es necesario.

¿Qué sucede?

En el **caso 1**, los rayos siguen una trayectoria recta, como lo corrobora el que las tres marcas luminosas sobre la pantalla estén alineadas verticalmente, como los láseres.

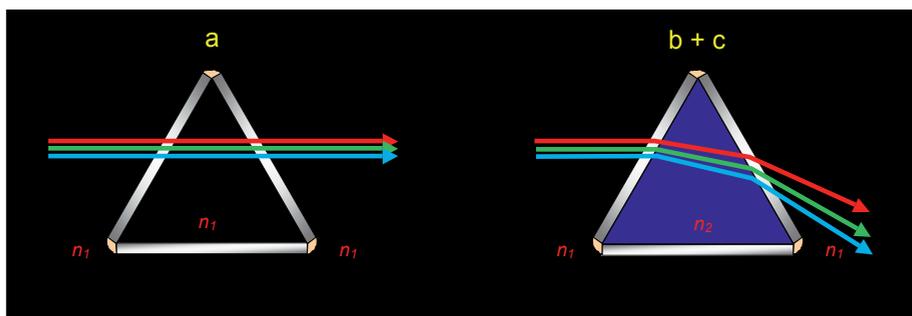
En el **caso 2**, cuando el nivel del agua queda por encima de las trayectorias de los rayos, se observa un desplazamiento de los puntos luminosos hacia un lateral de la pantalla, de tal manera que los colores no están ahora alineados verticalmente, pues el azul se desvía más que el verde y éste más que el rojo.

¿Cómo se explica?

Un prisma óptico es un medio transparente limitado por caras planas no paralelas.

Debido al fenómeno de refracción, al pasar un rayo de luz por el prisma se producen los siguientes casos:

- Si el prisma está vacío, el rayo de luz no sufrirá desviación al atravesarlo (con fines prácticos puede ignorarse la pequeña desviación debida a la refracción producida por las paredes del prisma).
- Si el prisma contiene agua, el rayo de luz se desviará al pasar del aire al agua y al pasar del agua al aire.
- La desviación del rayo depende del color de la luz, es decir, de su frecuencia: cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la desviación. Por tanto, el láser azul se desvía más que el verde y éste más que el rojo.



Sugerencias y comentarios

Si no se tiene puntero láser azul, el fenómeno se observa también con el láser rojo y el verde.

Puedes ir variando la inclinación con que incide la luz sobre una de las caras del prisma, hasta que consigas que no salga luz por la otra cara, debido a que se produce reflexión interna total (véase la experiencia 31). Observarás que el ángulo de incidencia sobre la cara exterior del prisma (y sobre la cara interior, si añades un poco de leche al agua) para el cual se produce este fenómeno es diferente para cada color.

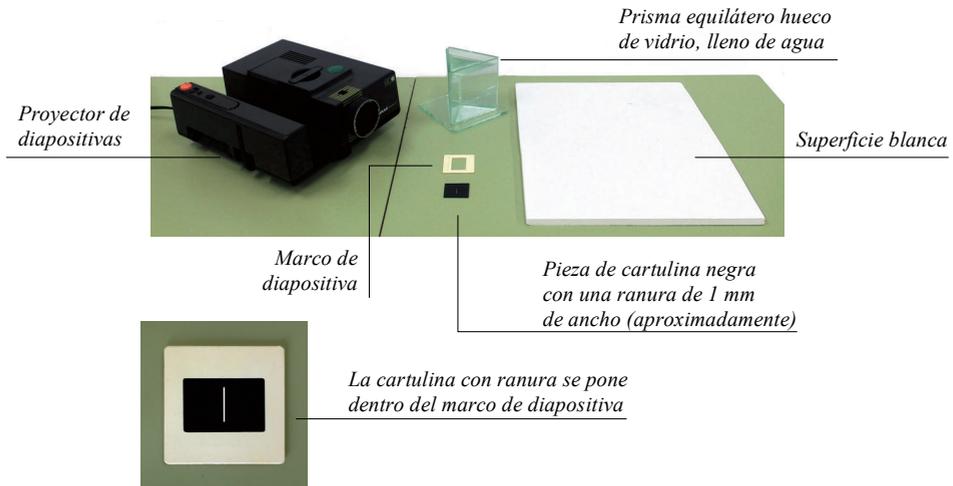
Repite la experiencia con otros líquidos (agua azucarada, agua salada, etanol...).

El experimento puede realizarse también con un prisma de vidrio.

36. Arco iris con un prisma de agua

La luz blanca está formada por colores que se pueden separar con un prisma.

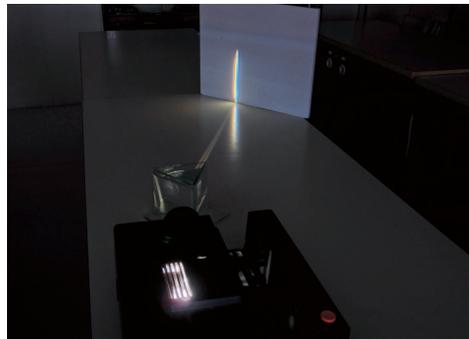
¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Coloca la superficie blanca, que actúa de pantalla, a cierta distancia del proyector. Pon el prisma junto al objetivo del proyector e inserta la diapositiva con la ranura vertical.



Enciende el proyector y haz incidir la luz sobre una de las caras del prisma. Ajusta el enfoque sobre la pantalla para obtener una imagen nítida de la dispersión cromática.

¿Qué sucede?

En la pantalla aparecen los diferentes colores que componen la luz blanca.



¿Cómo se explica?

La luz cambia su trayectoria cuando pasa de un medio transparente a otro donde su velocidad de propagación es diferente. Este fenómeno se denomina *refracción*.

La luz blanca es una mezcla de colores, cuya velocidad de propagación en un medio es diferente para cada uno de ellos, por lo que cada color experimenta una desviación distinta. Este fenómeno se denomina *dispersión cromática* de la luz por refracción. El color con menor velocidad de propagación es el violeta y sufre la mayor desviación, mientras que el color con mayor velocidad de propagación es el rojo y experimenta la menor desviación.

Sugerencias y comentarios

Una alternativa al proyector de diapositivas es un cañón de proyección conectado a un ordenador. Con un editor de textos o programa de dibujo se puede generar la imagen de una línea vertical blanca sobre fondo negro.

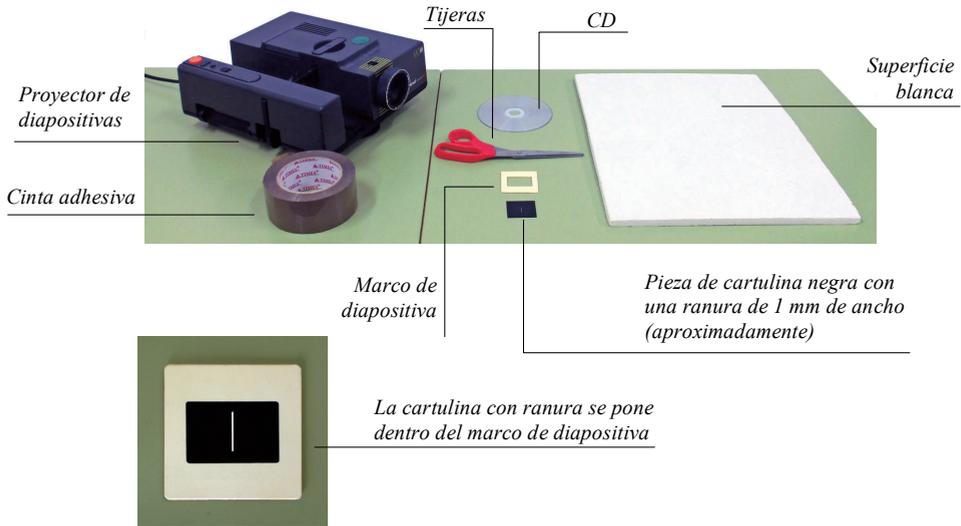
Si (a cierta distancia) detrás del primer prisma colocas otro idéntico, con sus caras paralelas pero los vértices en sentido opuesto, puedes intentar recomponer la luz blanca que descompuso en sus colores el primer prisma, tal como se atribuye a Isaac Newton (1643-1727) y se explica en muchos libros de texto. Pero no lo conseguirás, pues los colores saldrán del segundo prisma en la misma dirección con que llegó la luz al primer prisma, pero paralelos entre ellos, por lo que no se formará luz blanca (aunque a distancias pequeñas no se percibe con nitidez la sensación de colores y se tiene la sensación de luz blanca).

El experimento puede realizarse también con un prisma de vidrio.

37. Arco iris con un CD

La luz blanca está formada por colores que se pueden separar con un CD.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

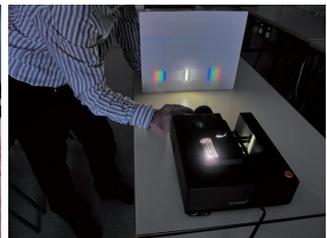
Corta con la tijera un fragmento de CD y elimina la capa de aluminio de una de sus caras pegando y despegando cinta adhesiva (al estilo de la depilación a la cera).



Coloca la diapositiva en el proyector.



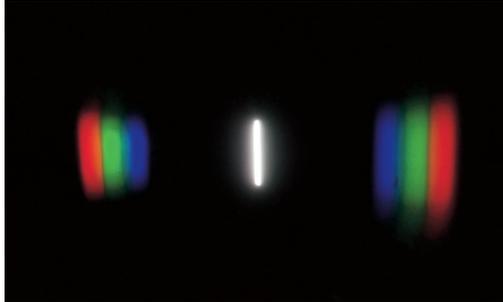
Sujeta (con la mano o una pinza) el fragmento de CD frente al objetivo del proyector.



Enciende el proyector y enfoca la rendija sobre la superficie de proyección.

¿Qué sucede?

En la superficie de proyección aparecen dos zonas coloreadas a ambos lados de la imagen de la rendija.



¿Cómo se explica?

Un CD contiene algo menos de 700 pistas por milímetro, prácticamente concéntricas, lo que supone una separación entre las mismas de $1,5 \mu\text{m}$, aproximadamente. Un conjunto de pistas o rendijas con estas características se denomina *red de difracción*. Cuando el tamaño de las rendijas de una red es del orden de la longitud de onda de la luz, ésta se dispersa al atravesarla, de modo que el grado de dispersión es más elevado cuanto mayor es la longitud de onda.

La luz es una mezcla de colores con diferente longitud de onda. Como la componente roja es la de mayor longitud de onda, esta luz es la que sufre mayor dispersión. El fenómeno producido se denomina *dispersión cromática* de la luz por difracción.

Sugerencias y comentarios

Observa por reflexión los colores en un CD sobre el que incide luz blanca.

Si cubres el orificio de un CD entero (sin la capa de aluminio) con un material opaco y observas el CD iluminándolo con una linterna de luz blanca, situada a cierta distancia del orificio, podrás observar anillos concéntricos de colores.

38. Los colores del cielo

¿Por qué el cielo es azul y el Sol del atardecer es rojo?

¿Qué se necesita?



Se "hincha" la gelatina poniéndola con agua en el vaso de precipitado. Después se calienta moderadamente el vaso con la gelatina y el agua restante hasta que la gelatina se funda.

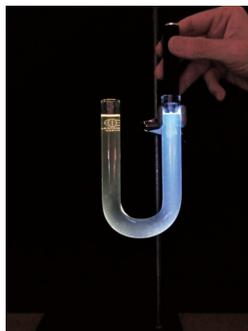
¿Qué hay que hacer?

Pon la disolución de gelatina en el tubo en U.
Con luz ambiente muy débil, ilumina con la linterna uno de los extremos del tubo en U.



¿Qué sucede?

El tubo en U con la disolución de gelatina actúa como una guía de onda para la luz, mostrando un color azulado en el extremo iluminado con la linterna y un color anaranjado en el otro extremo.

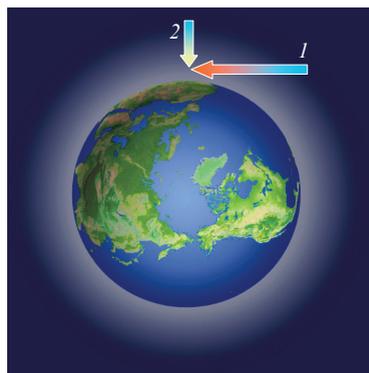


¿Cómo se explica?

Las dimensiones de las partículas de un coloide son muy inferiores a las longitudes de onda de los colores de la luz blanca. Cuando se da esta circunstancia las partículas esparcen la luz, aunque el esparcimiento es más intenso cuanto menor es la longitud de onda de la luz. Como las radiaciones de la región azul-violeta del espectro visible son las de menor longitud de onda, son éstas las más esparcidas. Esto es lo que se observa en la dirección transversal del extremo del tubo en U iluminado por la linterna. La luz que llega al otro extremo ha perdido mucha radiación azul-violeta y, por tanto, muestra una coloración próxima a los tonos naranja-rojizos. Este fenómeno se conoce como *esparcimiento Rayleigh** de la luz.

Lo que sucede en la disolución coloidal es parecido a lo que ocurre con la atmósfera terrestre. Los colores azul-violeta de la luz solar son esparcidos por las moléculas de los gases de la atmósfera en mayor grado que los colores de mayor longitud de onda. Esto explica el color azul del cielo.

Por otra parte, el recorrido de la luz del Sol a lo largo de la atmósfera es mayor durante el atardecer (*trayectoria 1* en la figura) que a mediodía (*trayectoria 2*). Durante el atardecer, la cantidad de luz azul-violeta esparcida por la atmósfera es muy elevada y la luz que finalmente llega a la superficie terrestre presenta una tonalidad naranja-rojiza.



Sugerencias y comentarios

En caso de no disponer de gelatina pueden utilizarse unas gotas de leche en agua como sustitutivo de la disolución coloidal. En lugar de un tubo en U se puede emplear un recipiente horizontal alargado y de paredes transparentes, como una pecera. Iluminándolo por uno de sus extremos se observará que emerge luz rojiza por el otro extremo; si se observa desde un lateral, se percibirá el color azulado de la luz esparcida.

La luz azulada que procede de la disolución coloidal (y la del cielo) está polarizada, lo cual puedes comprobar fácilmente con un filtro polarizador (o con unas gafas polarizadas).

* John William Strutt (1842-1919), tercer barón de Rayleigh.

39. Los colores básicos

La mezcla aditiva en proporciones adecuadas de rojo, verde y azul permite al ojo humano reconstruir prácticamente toda la gama de colores.

¿Qué se necesita?

*Ordenador u otro dispositivo
con pantalla LCD*



*Lupa
cuentahilos*

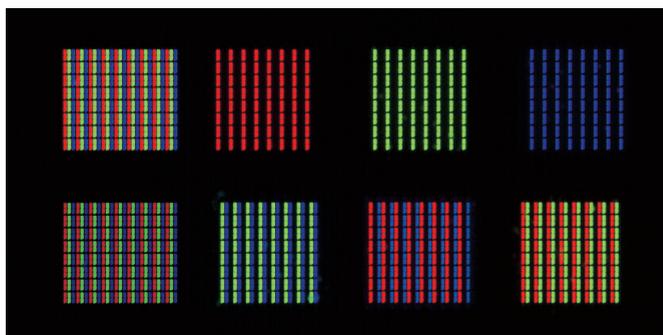
¿Qué hay que hacer?

Enciende el dispositivo para que en la pantalla aparezca una imagen fija.
Examina con la lupa detalles de la pantalla que tengan diferentes colores.

¿Qué sucede?

Se observan píxeles de color rojo, verde y azul. Un píxel es la superficie homogénea más pequeña de las que componen una imagen, que se define por su brillo y color.

Cualquier color de la imagen de la pantalla es una mezcla aditiva de píxeles, en las proporciones adecuadas de brillo.

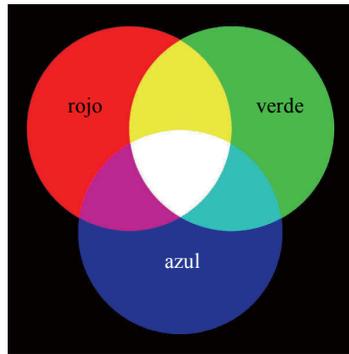


En la imagen se muestran cuadrados de 1,5 mm de lado cada uno (aproximadamente), en la pantalla de un ordenador. Estos cuadrados corresponden a los siguientes colores: (fila superior) blanco, rojo, verde y azul; (fila inferior) gris, cian, magenta y amarillo.

¿Cómo se explica?

Según la teoría de Young-Helmholtz* sobre la visión del color, las sensaciones cromáticas tienen lugar gracias a tres tipos de receptores, que responden a los *colores primarios*: rojo, verde y azul.

De acuerdo con esta teoría, los colores pueden obtenerse por superposición –*mezcla aditiva*– de esos colores primarios.



Sugerencias y comentarios

Abre tu programa favorito para editar (o presentar) documentos y marca la opción para elegir el fondo de pantalla (o las letras) de un color determinado. Verás que aparece una pestaña con las letras RGB (por Red-rojo, Green-verde, Blue-azul), de manera que puedes asignar un valor a cada uno de estos colores para obtener un color a tu gusto. Si observas la pantalla con la lupa cuentahilos (o sacas una macrofotografía), podrás comprobar cómo varía la proporción de cada color cuando modificas los valores que les asignas.

* Thomas Young (1773-1829); Hermann von Helmholtz (1821-1894).

40. Síntesis aditiva de colores

Del rojo y el verde al amarillo.

¿Qué se necesita?

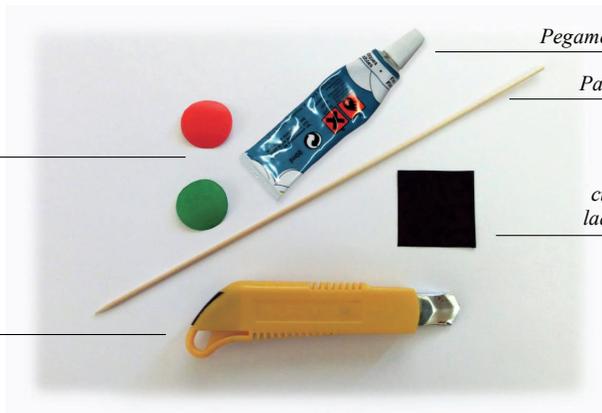
Círculos de papel charol verde y bermellón, de 3 cm de diámetro, aproximadamente

Pegamento

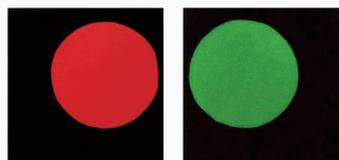
Palillo para brocheta

Cartulina negra cuadrada de 4,5 cm de lado, aproximadamente

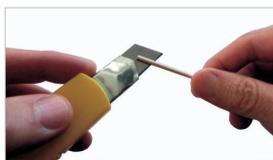
Cúter



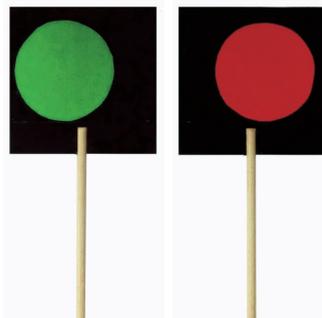
¿Qué hay que hacer?



Pega los círculos de papel charol en la cartulina negra, uno por cada cara. Los círculos deben estar desplazados respecto del centro de la cartulina, uno hacia la izquierda y el otro hacia la derecha, y ambos hacia la parte superior, de forma que exista una zona de solapamiento entre ellos de unos 2 cm en la parte central.

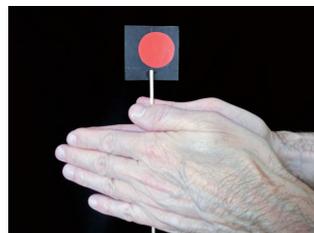


Con ayuda del cúter, realiza un corte longitudinal en el extremo ancho del palillo, de aproximadamente, 1 cm de longitud.



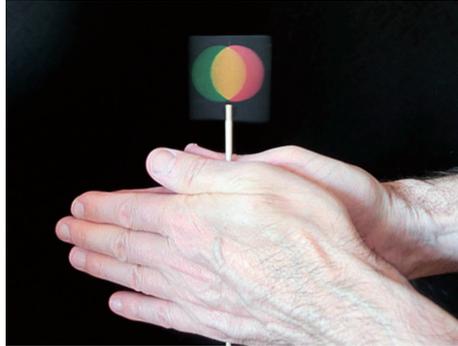
Introduce en este corte la cartulina, centrada por la parte inferior y fíjala con una gota de pegamento.

Sitúa el palo entre las palmas de las manos y hazlo girar desplazando rápidamente una mano respecto de la otra. Observa la cartulina mientras gira.



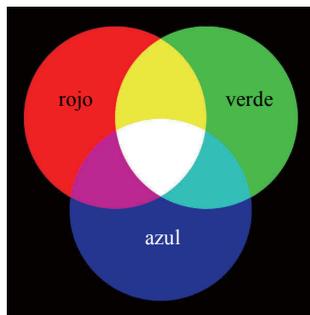
¿Qué sucede?

Durante el giro se observan tres zonas de diferentes colores: dos zonas laterales, una de color rojo y otra de color verde, y una zona central (la de solapamiento de los círculos) de color amarillo.



¿Cómo se explica?

De acuerdo con la teoría de Young-Helmholtz sobre la visión del color, los colores secundarios (amarillo, cian y magenta) pueden obtenerse por mezcla aditiva de los colores primarios (rojo, verde y azul). La superposición del rojo y del verde se percibe como color amarillo.



Sugerencias y comentarios

Se pueden hacer más dispositivos utilizando otros pares de colores primarios: azul-rojo y verde-azul. También se pueden decorar peonzas con varias parejas de colores (a partes iguales o en diferentes proporciones), para ver cuál es el color resultante.

Se puede sustituir el papel charol por papel adhesivo de color.

41. Los canales de una imagen

Pueden imprimirse por separado los colores secundarios de una imagen y reconstruir a partir de ellos la imagen original.

¿Qué se necesita?

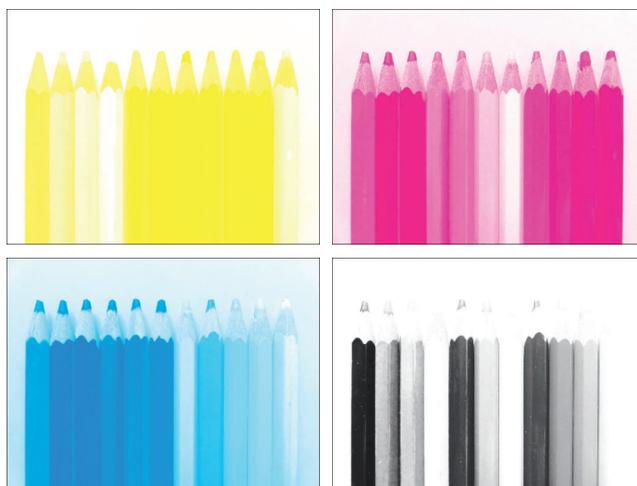


¿Qué hay que hacer?

Se parte de una fotografía digital, preferiblemente con mucho colorido.

Mediante el software de tratamiento de imágenes, separa los canales correspondientes a los colores amarillo, magenta, cian y, opcionalmente, negro.

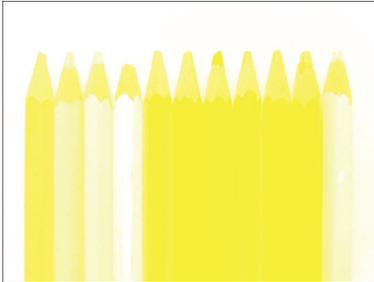
Imprime en transparencias separadas los diferentes canales en sus correspondientes colores (tres transparencias, o cuatro si se incluye la de color negro).



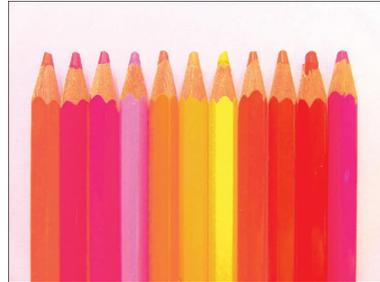
Superpón las transparencias, exactamente ajustadas, sobre un papel blanco y observa el conjunto frente a una luz intensa.

¿Qué sucede?

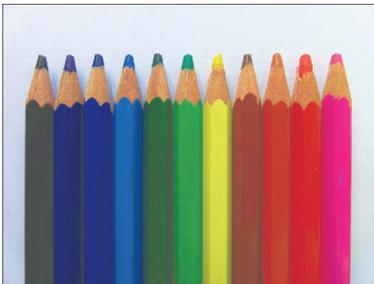
A medida que se superponen las transparencias se reconstruye la fotografía original.



1. Transparencia amarilla.



2. Transparencias amarilla y magenta.



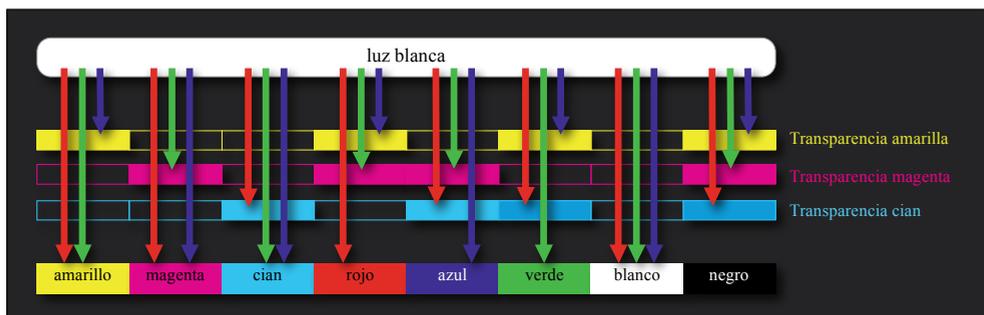
3. Transparencias amarilla, magenta y cian.

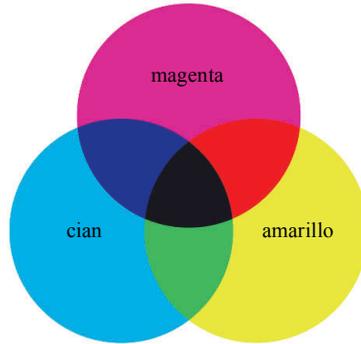


4. Transparencias amarilla, magenta, cian y negra.

¿Cómo se explica?

En una mezcla sustractiva de colores cada pigmento o colorante se comporta como un filtro de luz, absorbiendo (o sustrayendo, de ahí el nombre) selectivamente las longitudes de onda que no dan lugar al color observado. En nuestro caso, cada uno de los pigmentos o colorantes –amarillo, magenta o cian– que se encuentra en cada una de las transparencias, respectivamente, sustrae color a la luz blanca incidente.





Sugerencias y comentarios

Observa qué sucede cuando no se superpone alguna de las transparencias.

En papelerías especializadas puedes conseguir hojas de plástico con los colores básicos de la mezcla sustractiva. Si las superpones adecuadamente, podrás obtener diferentes colores.

En los programas de edición de textos, imágenes, etc., también pueden definirse los colores mediante el código CMYK (Cyan-cian, Magenta-magenta, Yellow-amarillo, Black/Key-negro).

El método sustractivo para obtener colores es el empleado por los pintores, así como en la industria de la impresión en color, de la elaboración de tintes, etc.

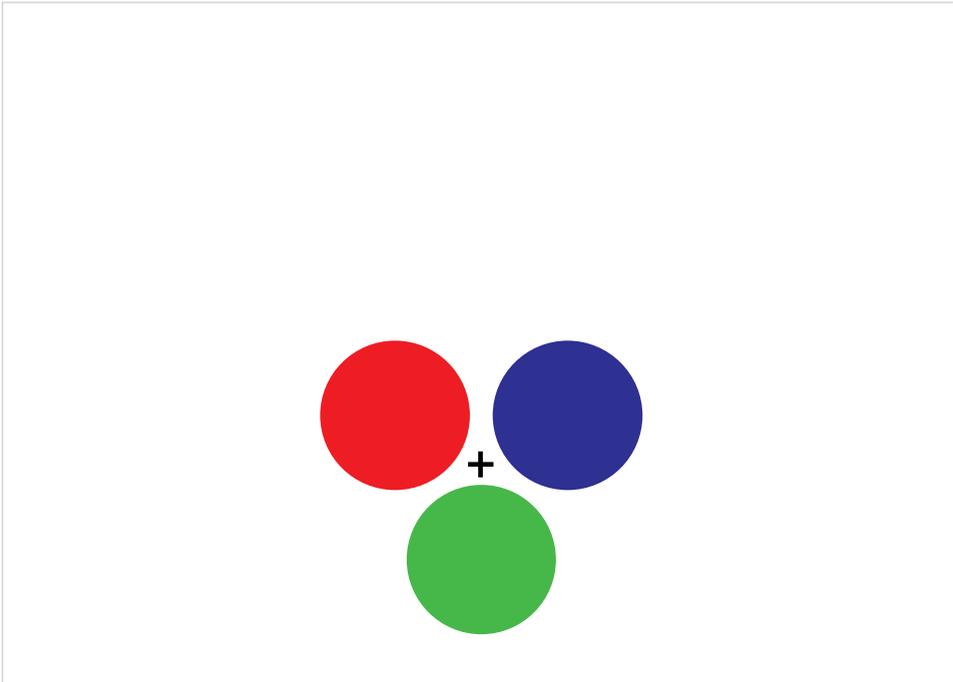
El puntillismo es una técnica pictórica que obtiene las gamas cromáticas mediante la aplicación sobre el lienzo de puntos con colores primarios, que, cuando se observan desde determinada distancia producen la sensación de colores deseada por el artista.

42. Post-imagen

Parece como si, tras la "fatiga" causada por la observación prolongada de un color, los órganos de la visión "descansaran" provocando la percepción del color complementario.

¿Qué se necesita?

Una superficie rectangular blanca y figuras de diversos colores situadas a un lado de la superficie, de manera que quede tanto espacio en blanco como el ocupado por los colores. En este caso, las figuras son círculos de color rojo, azul y verde.



¿Qué hay que hacer?

Mira sin parpadear, durante treinta segundos como mínimo, la cruz situada en el centro del conjunto de círculos coloreados. Luego desvía rápidamente la vista hacia el centro de la superficie blanca, al tiempo que parpadeas; conviene que cubras, con una hoja blanca, los círculos coloreados para que no queden a la vista.

¿Qué sucede?

Durante un pequeño intervalo de tiempo se percibe sobre la superficie blanca un conjunto de círculos, dispuestos como los observados previamente, pero de color cian, amarillo y magenta.

¿Cómo se explica?

El fenómeno (que también se conoce como *post-imagen*) se explica con la *ley de los contrastes sucesivos* propuesta por el químico francés Michel Eugène Chevreul (1786-1889). Cuando los ojos han mirado por algún tiempo uno o más objetos coloreados, tras dejar de mirarlos perciben imágenes de los mismos con colores complementarios a los de los objetos reales. Esto se debe a que en la retina hay tres tipos de receptores de color, denominados conos, siendo cada uno de ellos más sensible al rojo, al verde o al azul, respectivamente. Tras observar un determinado color fijamente durante un tiempo largo, sus receptores se fatigan. Por ello, cuando se mira a una superficie blanca, los receptores fatigados no responden de forma óptima y, por lo tanto, predomina la información procedente de los otros receptores, por lo que se percibe el color complementario al que ha fatigado sus conos.

Sugerencias y comentarios

Realiza el mismo experimento observando, por ejemplo, objetos coloreados con los colores secundarios: amarillo, magenta y cian.

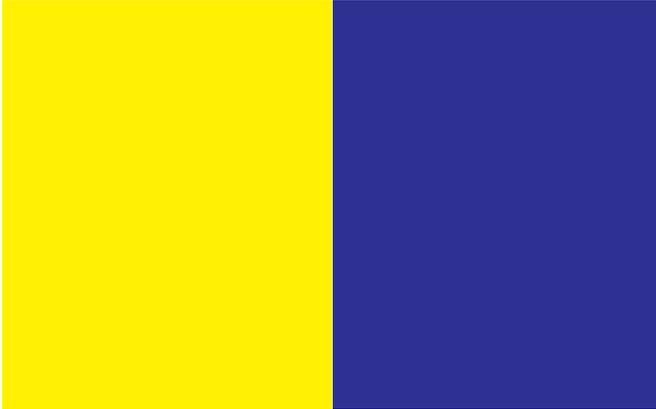
Crea una figura en blanco y negro mediante un programa de edición de imágenes. Seguidamente, usa la pestaña de efectos para invertir los colores de la figura. Imprime la figura con los colores invertidos y, tras observarla fijamente durante un tiempo (20 segundos, aproximadamente), dirige tu vista hacia un fondo blanco. Observarás durante un breve lapso de tiempo la figura que habías creado originalmente.

Se puede comprobar que este efecto tiene su origen en los fotorreceptores de la retina y no en la corteza visual. Para ello, basta con observar fijamente una imagen mediante un solo ojo y, luego, emplear el otro para ver la post-imagen. Ésta no se formará porque se ha generado en la retina cuyos fotorreceptores se fatigaron por la exposición prolongada e intensa al estímulo luminoso.

43. Colores subjetivos

Los impresionistas aplicaron en su pintura de forma consciente las consecuencias de las leyes sobre la percepción del color expuestas por Chevreul.

¿Qué se necesita?



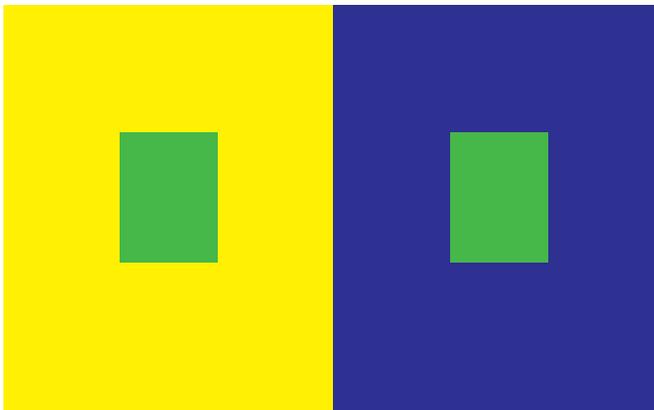
Una figura como ésta, formada por dos rectángulos de colores amarillo y azul, respectivamente, que será la superficie de trabajo



Un fragmento de papel o cartulina verde

¿Qué hay que hacer?

Corta dos rectángulos iguales del fragmento de papel o cartulina verde y coloca cada uno en el centro de cada rectángulo de la superficie de trabajo.



¿Qué sucede?

Aunque los dos rectángulos verdes son iguales, parecen mostrar tonalidad diferente. El que se encuentra encima del rectángulo amarillo presenta una tonalidad más oscura, mientras que el que se encuentra encima del rectángulo azul presenta una tonalidad más clara.

¿Cómo se explica?

Según la *ley de los contrastes simultáneos* de Chevreul, dos colores adyacentes serán percibidos de la forma más diferente posible. El resultado puede interpretarse como si el rectángulo amarillo “arrojara” su color complementario (azul) sobre el pequeño rectángulo verde. Esto le proporcionaría la tonalidad más oscura que presenta. Por otra parte, el rectángulo azul “arrojará” su color complementario (amarillo) sobre el pequeño rectángulo verde, por lo que éste presentaría tonalidad más clara.

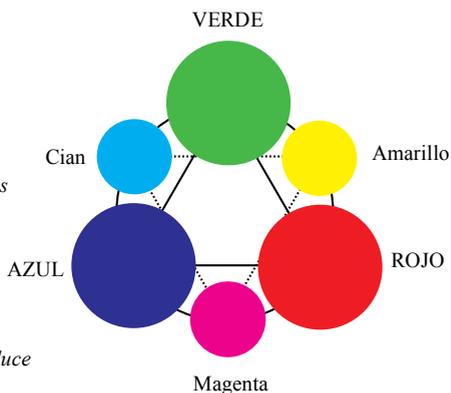
La figura muestra los tres **colores primarios**: ROJO, AZUL y VERDE. La mezcla aditiva de los colores primarios produce los **colores secundarios**: MAGENTA, CIAN y AMARILLO, de la siguiente forma:

ROJO + AZUL → MAGENTA
AZUL + VERDE → CIAN
VERDE + ROJO → AMARILLO

Los colores que en la figura se encuentran en posiciones opuestas se llaman **complementarios**. Por lo tanto, son complementarios:

ROJO y CIAN
AZUL y AMARILLO
VERDE y MAGENTA

La mezcla aditiva de dos colores complementarios produce BLANCO, mientras que la mezcla sustractiva de los mismos (mezcla de pigmentos) produce el NEGRO.



Sugerencias y comentarios

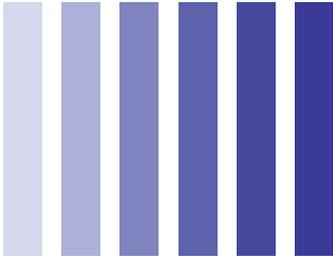
Utilizando acuarelas o lápices de colores, pinta sobre un papel blanco dos manchas de color verde. La de la izquierda se recubre con un ligero color azul y la de la derecha con un ligero color amarillo. El resultado será muy parecido al de la percepción de los rectángulos verdes en la superficie de trabajo.



44. Ilusión de Chevreul

La percepción de un tono se ve influenciada por el tono que lo rodea.

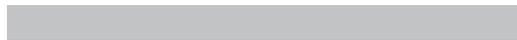
¿Qué se necesita?



Seis tiras verticales uniformes de tono azul, ordenadas de menor a mayor luminosidad



Superficie con degradado de negro a blanco

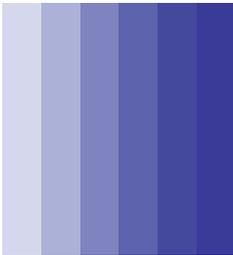


Tira horizontal uniforme de color gris claro

¿Qué hay que hacer?

Experimento 1

Sitúa las tiras verticales de forma contigua, sin dejar huecos entre ellas.



Experimento 2

Coloca la tira horizontal gris sobre la superficie degradada.



¿Qué sucede?

En el **experimento 1**, las tiras verticales de tono y luminosidad uniforme aparentan tener más oscuro el borde adyacente a una tira más luminosa (*ilusión de Chevreul*).

En el **experimento 2**, la zona de la tira horizontal que se encuentra sobre la parte izquierda (oscura) de la superficie se percibe más clara que la que se encuentra sobre la parte derecha de dicha superficie.

¿Cómo se explica?

Estos fenómenos se explican con la *ley de los contrastes simultáneos* de Chevreul. Esta ley establece que cuando se colocan de forma adyacente figuras de un mismo color y diferente luminosidad, el contraste entre ellas es mayor que cuando se ven por separado.

Según esta ley, en el **experimento 1** la mitad izquierda de cada tira vertical se percibe más oscura y la mitad derecha más clara, debido a la influencia de las tiras adyacentes.

Debido a la misma ley, en el **experimento 2** la tira horizontal se percibe más oscura hacia la derecha y más clara hacia la izquierda debido a la influencia de la superficie degradada, que es más oscura por la derecha que por la izquierda.

Sugerencias y comentarios

La *ilusión de Chevreul* no se percibe si las tiras adyacentes son de diferentes colores.

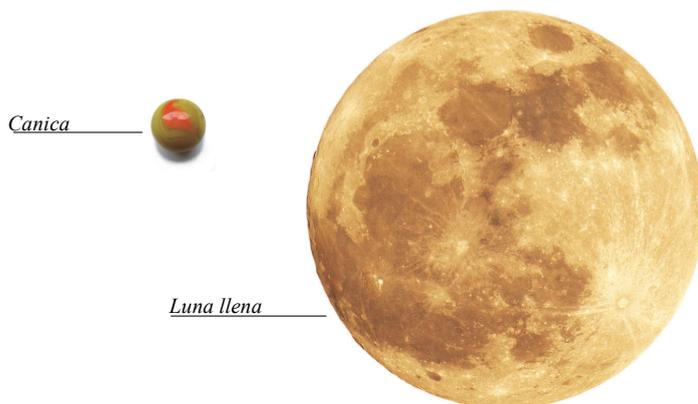
En lugar de tiras verticales se pueden emplear tiras horizontales de contornos irregulares (por ejemplo, rasgando a mano las tiras) y superponiéndolas como si fueran las montañas que se observan en el horizonte a diferentes distancias. Nuevamente se tendrá la sensación de que las tiras son más oscuras por sus bordes adyacentes a las tiras más luminosas. ¡Pero la luminosidad de cada tira es uniforme!

Los experimentos 1 y 2 pueden realizarse usando otros colores.

45. Canicas como lunas

Dos objetos se perciben con igual tamaño si su diámetro angular es el mismo.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Durante la fase de Luna llena, y con un ojo guiñado, sujeta una canica de modo que puedas observar su posición próxima a la Luna.

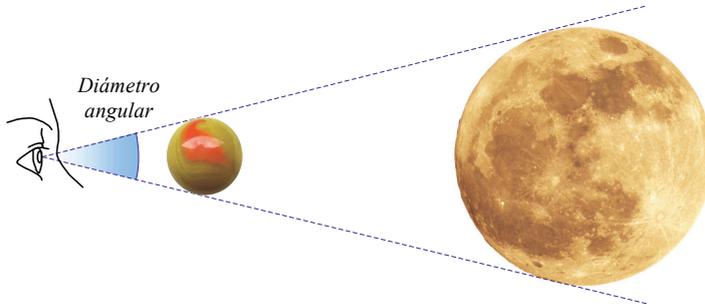


¿Qué sucede?

Si se mueve la canica, acercándola o alejándola del observador, se encuentra una posición en la que la canica y la Luna muestran aparentemente un mismo tamaño.

¿Cómo se explica?

El diámetro (o tamaño) angular de un objeto esférico es el ángulo aparente que subtende su diámetro, desde el punto de vista del observador. En esta experiencia, cuando el observador mueve la canica consigue que en algún momento su diámetro angular coincida con el de la Luna.

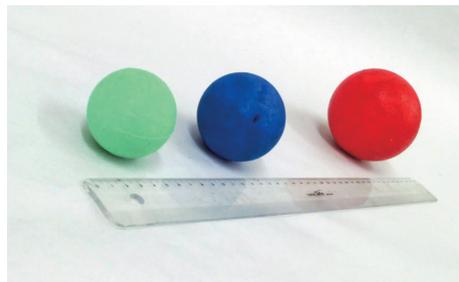
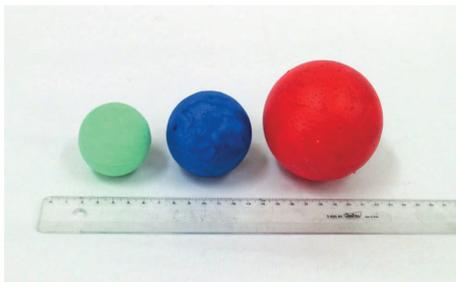


El mismo resultado se habría alcanzado realizando el experimento de la canica con el Sol (cosa que **nunca** debe hacerse porque provocaría un grave daño a la retina).

¿Cómo se explica que la Luna y el Sol tengan un diámetro aparente parecido? El diámetro del Sol es de 1,39 millones de kilómetros y su distancia media a la Tierra es de 149 millones de kilómetros, aproximadamente. Por otra parte, la Luna tiene un diámetro de 3476 km y su distancia media es de 384000 kilómetros, aproximadamente. A pesar de las grandes diferencias entre los dos astros, la relación entre su diámetro y la distancia a la Tierra de los dos es muy parecida. Este hecho singular explica que, durante los eclipses de Sol, la Luna oculte casi exactamente el disco solar.

Sugerencias y comentarios

El experimento puede hacerse observando bolas de distinto diámetro situadas a diferente distancia del ojo del observador.

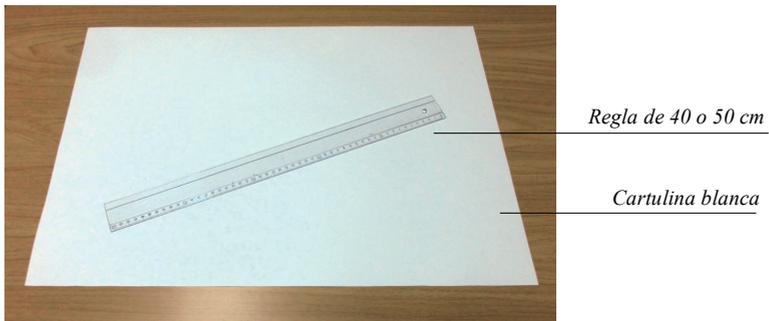


Con una buena cámara fotográfica (para controlar el enfoque y la profundidad de campo) se puede conseguir la ilusión óptica de que un niño y un adulto parezcan de la misma altura si se colocan convenientemente para que su tamaño angular sea el mismo desde el punto de vista de la cámara; también se puede emplear un programa de edición fotográfica.

46. Profundidad de campo del ojo

El ojo sólo ve de forma nítida un cierto intervalo de distancias.

¿Qué se necesita?



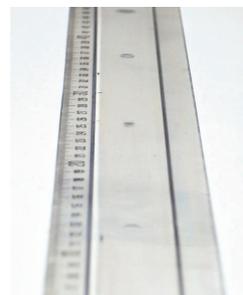
¿Qué hay que hacer?

Coloca la cartulina sobre una mesa y pon encima la regla, con el cero próximo al borde de la mesa. Sitúa la cara próxima al borde señalado, cierra un ojo y observa la escala con el otro ojo.



¿Qué sucede?

El ojo ve nítidamente un rango de la escala, mientras que el resto aparece desenfocado. Para una persona adulta, el rango está comprendido entre 25 y 30 cm, aproximadamente.

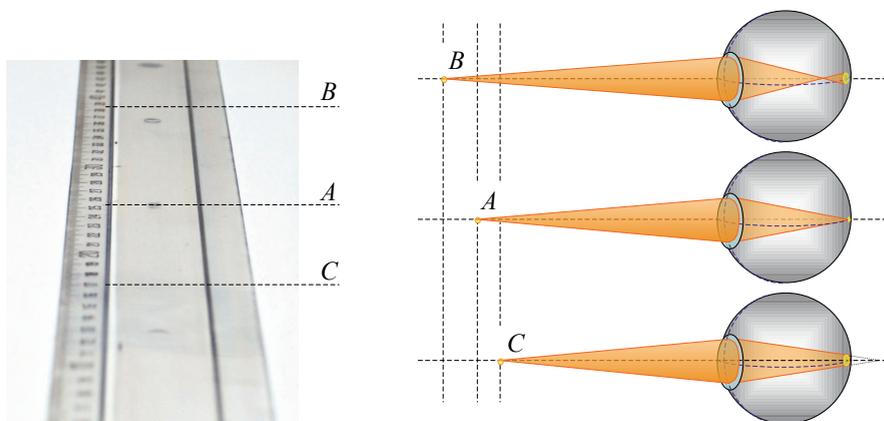


¿Cómo se explica?

El punto más cercano que un ojo es capaz de enfocar se llama *punto próximo*. Para un niño se encuentra a unos 7 cm, pero la distancia aumenta con la edad, de modo que para una persona de unos 40 años es de unos 25 cm.

En cualquier caso, cuando el ojo se acomoda para ver un objeto situado a cierta distancia A , consigue ver también con razonable nitidez objetos que se encuentran a mayor y menor distancia (B y C , respectivamente). La profundidad de campo viene dada por la longitud del intervalo BC .

En la figura se observa que la imagen del punto A es otro punto que se sitúa en la misma retina, por lo que la imagen de ese punto se percibe nítidamente. El punto imagen del punto B se sitúa delante de la retina y forma en ésta una imagen circular borrosa (*círculo de confusión*). Por último la imagen del punto C se situaría detrás de la retina, por lo que forma en ésta otro círculo de confusión. Si los círculos de confusión son suficientemente pequeños las imágenes pueden ser de una nitidez aceptable.



Sugerencias y comentarios

Los defectos de visión y la luminosidad ambiente cambian la profundidad de campo y modifican la posición del punto próximo. En el caso de la miopía, la distancia se reduce, mientras que aumenta en el caso de la hipermetropía. El aumento de luminosidad provoca contracción de la pupila, con la consiguiente reducción del diámetro del haz luminoso y aumento de la profundidad de campo.

Si dispones de una cámara fotográfica en la que pueda ajustarse la apertura, podrás comprobar que cuanto más pequeña sea ésta, mayor será el rango de distancias enfocadas (que se denomina *profundidad de campo*).

47. Agudeza visual

¿Qué tamaño angular tiene el objeto más pequeño que puede percibir el ojo?

¿Qué se necesita?



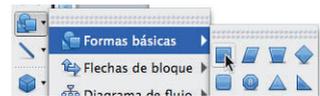
¿Qué hay que hacer?

Preparación de una trama

Abre en el ordenador un editor de textos (*Word*, *LibreOffice...*).

Con las *herramientas de dibujo* construye un cuadrado. Puede ser de 5 centímetros de lado, aproximadamente.

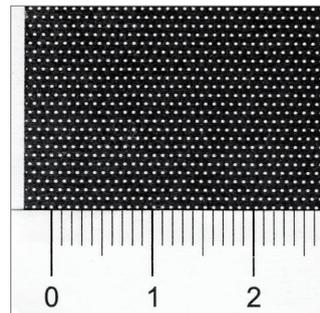
En *color de relleno*, selecciona *efectos de relleno* y, allí, *trama*. Rellena con la trama de 80 % (color negro).



Imprime la figura en una hoja de papel blanco.

Mide con la cinta métrica la distancia entre un número suficiente de puntos (que habrás contado previamente), con el fin de determinar la distancia entre dos puntos consecutivos.

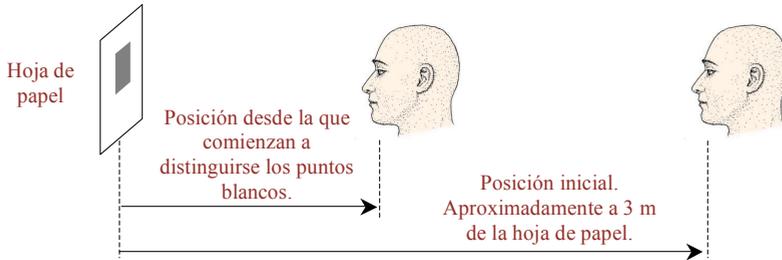
En el caso que se muestra en la figura, el espaciado entre 13 puntos mide 11 milímetros. Por lo tanto, la distancia entre dos puntos consecutivos es de 0,85 milímetros.



Observación de la trama

Sujeta sobre una pared la hoja de papel en que está impresa la trama, en un lugar bien iluminado.

Una persona sin defectos de visión se sitúa frente a la hoja de papel, a una distancia de, aproximadamente, 3 metros y se acerca lentamente a la hoja de papel, sin dejar de mirarla. Cuando la persona comienza a percibir los puntos blancos, se detiene.

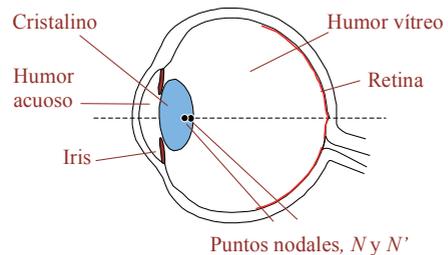


Cuando la persona se encuentra lejos de la hoja, la superficie se percibe como si fuera de un gris oscuro uniforme; pero a una distancia comprendida entre 2,5 y 2 metros, comienza a distinguir los puntos.

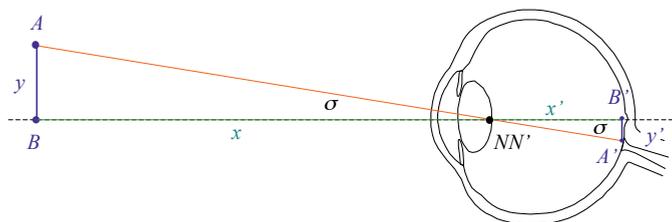
¿Cómo se explica?

El ojo humano puede considerarse como un sistema óptico con una lente convergente, el *crystalino*, que está situada entre dos medios: el *humor acuoso* y el *humor vítreo*, con unos índices de refracción próximos al del agua.

En este sistema óptico pueden fijarse dos puntos, llamados *puntos nodales*.^{*} Estos dos puntos están muy cercanos, de modo que, para nuestro fin, puede admitirse sin demasiado error que coinciden y que su posición está aproximadamente a 17 milímetros de la *retina*.



Si desde una distancia x se observan dos puntos A y B cuya separación es y , el ángulo mínimo σ bajo el cual se perciben separadamente esos puntos mide la *agudeza visual*.



^{*} Los *puntos nodales* de un sistema óptico son dos puntos con la propiedad de que los rayos conjugados que pasan por ellos son paralelos.

En nuestro caso, una persona comenzó a distinguir los puntos blancos de la trama, separados 0,85 mm, cuando se hallaba a una distancia de 2,45 m, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned}\tan \sigma &= \frac{y}{x} \\ \tan \sigma &= \frac{0,85 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,45 \text{ m}} = 3,47 \times 10^{-4} \\ \sigma &= 1,2 \text{ minutos de arco}\end{aligned}$$

Para comprender mejor el significado de este valor se puede considerar el hecho de que desde nuestro planeta observamos la Luna bajo un ángulo de 30 minutos. Por tanto, nuestro ojo podría percibir separadamente detalles próximos a 1/25 del diámetro lunar.

El experimento puede aprovecharse para determinar la distancia mínima en la retina, y' , entre las imágenes de A y B , que se han denominado A' y B' . Representando por x' la distancia desde los puntos nodales hasta la retina (17 mm), puede establecerse la siguiente proporción:

$$\begin{aligned}\frac{y'}{x'} &= \frac{y}{x} \\ y' &= \frac{x' \cdot y}{x} = \frac{1,7 \times 10^{-2} \text{ m} \times 0,85 \times 10^{-3} \text{ m}}{2,45 \text{ m}} = 5,9 \times 10^{-6} \text{ m} \\ y' &= 5,9 \mu\text{m}\end{aligned}$$

El valor que se ha obtenido se aproxima al tamaño de los fotorreceptores de la retina.*

Sugerencias y comentarios

Puede realizarse una evaluación más completa de una misma persona, con tramas de diferente espaciado entre los puntos.

La trama de puntos es un método empleado en la industria gráfica para reproducir imágenes con degradación de tonos. Observa con un cuentahilos (o una lupa) las imágenes impresas en diarios, revistas... y descubrirás la trama de puntos con que está formada.

* El cálculo realizado es puramente geométrico. En realidad, el criterio para distinguir separadamente las imágenes de dos puntos próximos debe tener en cuenta la difracción de la luz. La imagen de un punto objeto no es otro punto, sino que está formado por un disco circular brillante rodeado de anillos concéntricos de intensidad decreciente, llamados *anillos de Airy*, en honor de George Biddell Airy (1801-1892).

48. Visión binocular

Cada uno de los ojos percibe una imagen diferente.

¿Qué se necesita?

*Dos tiras de cartulina negra,
de 1,5 cm por 10 cm,
aproximadamente*



¿Qué hay que hacer?

Sítuate mirando hacia una superficie clara o un paisaje.



Sujeta cada tira con una mano y mantén dichas tiras horizontalmente, a la altura de la vista, con una separación entre ellas mayor que la de los ojos.



Acerca lentamente las dos tiras hasta que sus extremos próximos se encuentren a menor distancia que la que hay entre los ojos.

¿Qué sucede?

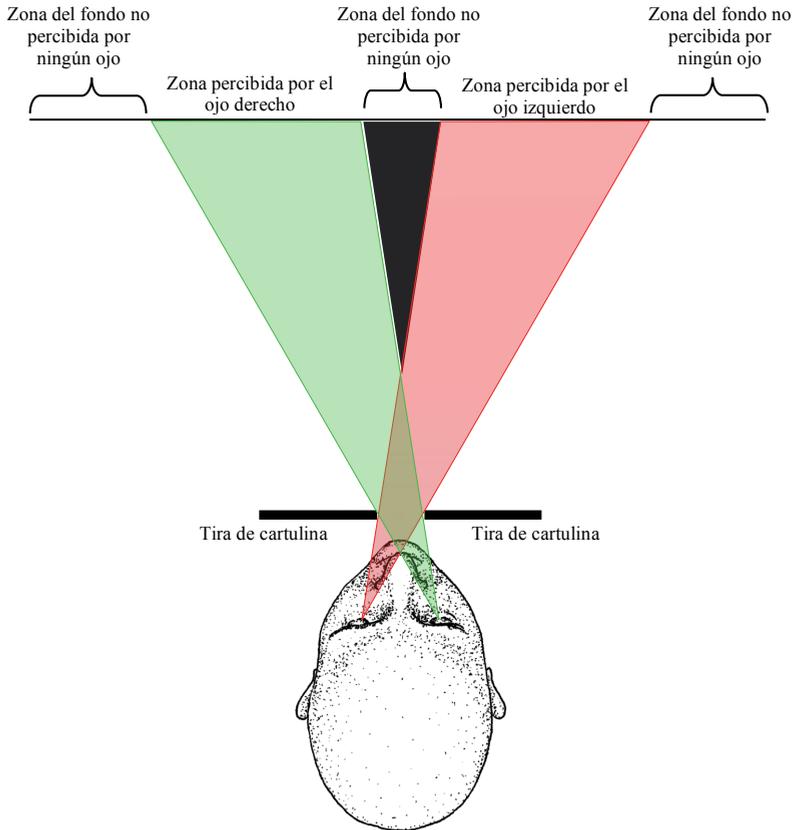
El observador percibe una parte central negra flanqueada por dos huecos a través de los cuales se ve el fondo.



Ver

¿Cómo se explica?

Cada uno de los ojos percibe una imagen diferente. Cuando los extremos próximos de las tiras están a menor distancia que la que hay entre los ojos, existe una zona de la superficie del fondo que no puede verse por ninguno de ellos. El cerebro combina las imágenes captadas por cada ojo, dando lugar a una imagen global en la cual aparece la zona oscura central, que corresponde a la superposición de las porciones de tiras percibidas por ambos ojos.



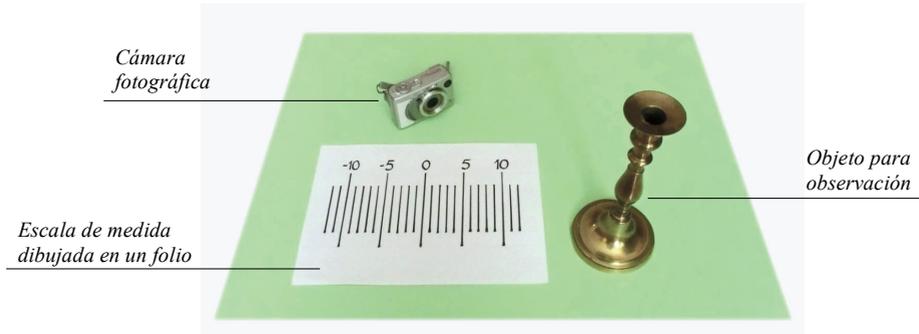
Sugerencias y comentarios

Repita el experimento sustituyendo las tiras por un dedo y un rotulador más ancho que el dedo. Cuando ambos se encuentran a menor distancia que la separación entre ojos parece como si el dedo atravesase el extremo del rotulador. Si se sustituyen las tiras de cartulina por los dedos de cada mano, se obtiene una conocida ilusión óptica, que consiste en ver una “salchicha” flotando alineada entre los dedos.

49. Visión tridimensional

La percepción tridimensional se debe a la visión binocular.

¿Qué se necesita?

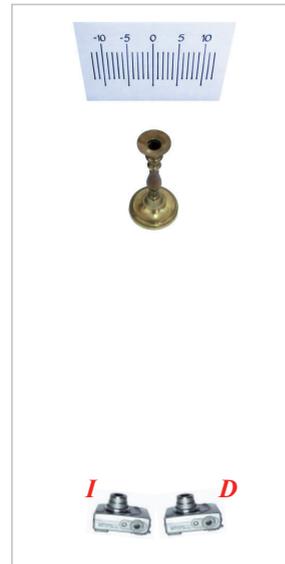
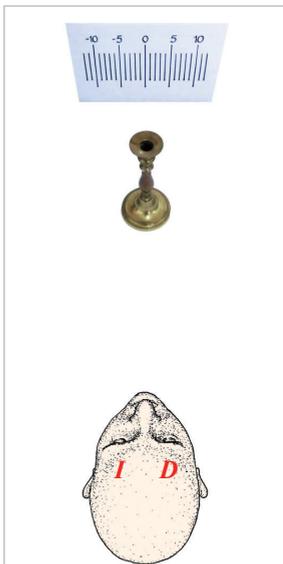


¿Qué hay que hacer?

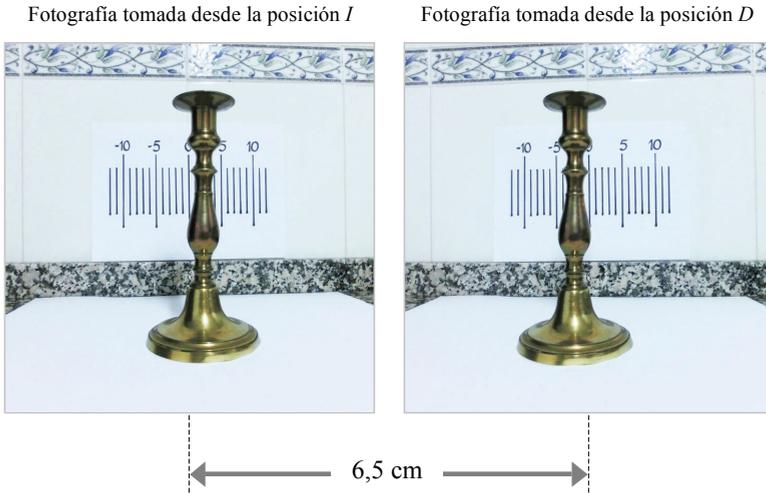
1. Situar, alineados, el centro de la escala, el objeto y la nariz del observador; en este orden.

El observador mira el objeto tapando alternativamente el ojo derecho y el ojo izquierdo.

2. El observador se retira y se hacen dos fotografías del objeto, colocando la cámara fotográfica en las posiciones que ocupaban inicialmente los ojos del observador.



3. La fotografía tomada con la cámara en la posición *I* se recorta dándole forma cuadrada, con un lado igual o inferior a 6 cm. Se hace lo mismo con la fotografía tomada con la cámara en la posición *D*. Esta última se coloca a la derecha de la primera, de modo que la distancia entre sus centros sea parecida a la de la separación entre los ojos de una persona, que suele ser de 6,5 cm, aproximadamente.



4. El observador examina las fotografías tomadas según lo dicho en el apartado 2, con una mano (o una cartulina) situada frente a la nariz, para conseguir que cada ojo solo pueda ver la fotografía que se encuentra frente a él. Es necesario un pequeño entrenamiento para lograr fundir las dos imágenes en una sola.

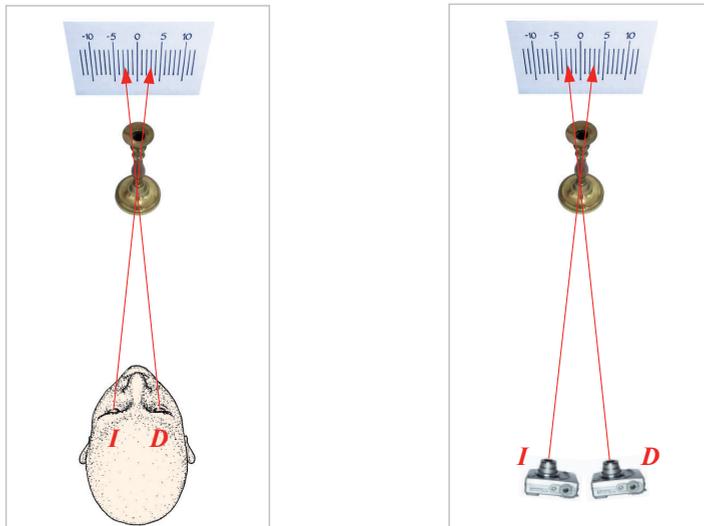


¿Qué sucede?

En la situación descrita en el apartado 2 precedente, el observador percibe el objeto superpuesto sobre posiciones diferentes de la escala que se encuentra al fondo. Las imágenes son análogas a las que toma la cámara fotográfica en las condiciones señaladas en el apartado 2; es decir, percibe, imágenes como las fotografías que ilustran el apartado 3.

En el apartado 4, cuando el observador logra fundir las dos imágenes en una sola, ésta se percibe de forma tridimensional.

¿Cómo se explica?

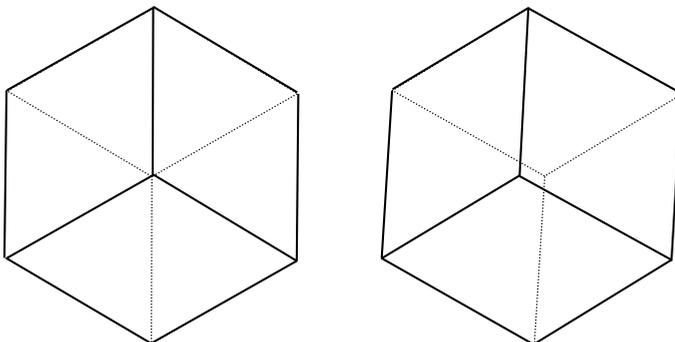


Debido a la separación que existe entre los dos ojos, las imágenes que perciben ambos son ligeramente diferentes. En el caso que nos ocupa, la línea visual que va desde el ojo izquierdo al objeto se proyecta en un punto de la escala diferente al punto en el que lo hace la línea visual que va desde el ojo derecho al objeto. Lo mismo sucede si una cámara fotográfica, situada sucesivamente en las posiciones en que se encontraban ambos ojos, registra dos imágenes del objeto.

Cuando dichas imágenes están impresas a una distancia igual a la de la separación entre los ojos y se obliga al ojo izquierdo para que mire exclusivamente la imagen tomada por la cámara en la posición *I* y al ojo derecho a que haga lo mismo con la imagen tomada por la cámara en la posición *D*, el cerebro funde las dos imágenes en una sola con sensación tridimensional.

Sugerencias y comentarios

Conociendo el fundamento de la visión tridimensional pueden llegar a diseñarse figuras que, observadas adecuadamente, se perciban como si tuvieran volumen.

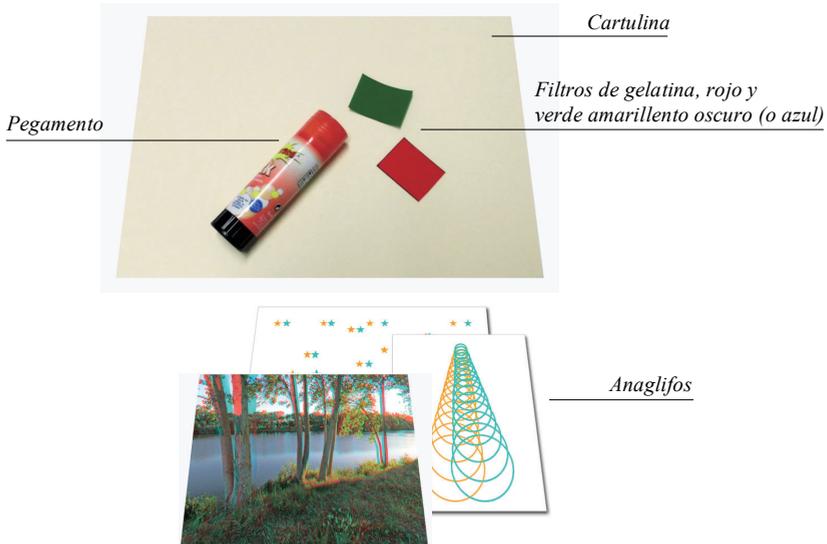


En el plano hay que representar figuras que corresponden a objetos tridimensionales. Para ello se recurre a la perspectiva (siendo el escorzo un caso exagerado de esta técnica), la iluminación, etc. En algunos casos, la percepción tridimensional por parte del observador puede ser ambivalente, como en la figura previa, que puede interpretarse como la parte exterior de un cubo macizo, con el vértice central próximo al observador, o como la parte interior del mismo cubo, con el vértice central alejado del observador.

50. Anaglifos

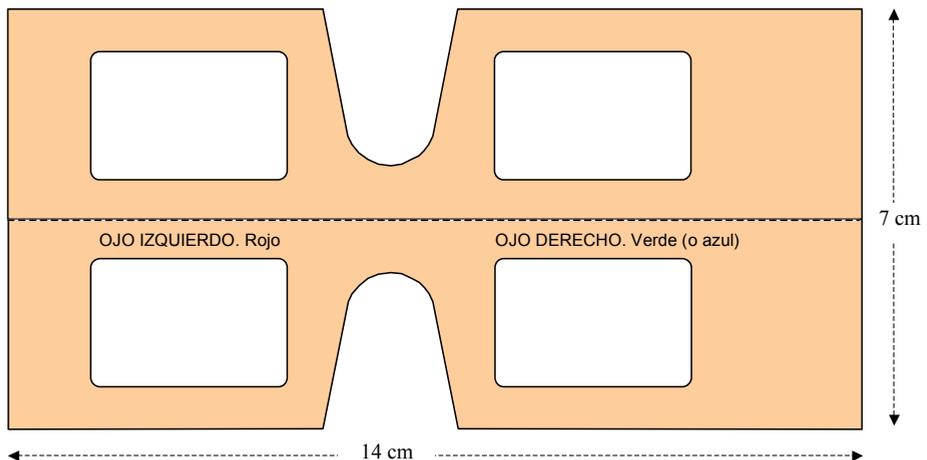
Del griego *anaglyphos*, grabado en relieve.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

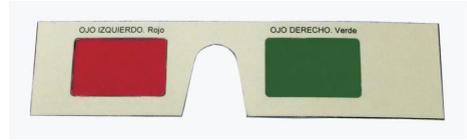
1. Construye las gafas. Para ello calca o imprime sobre la cartulina la imagen de las gafas que se muestra en esta figura.



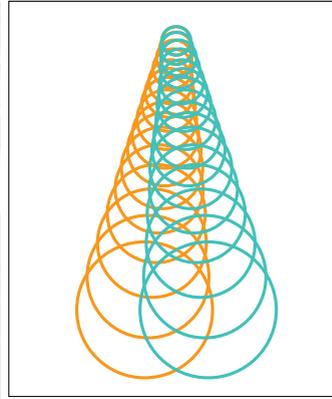
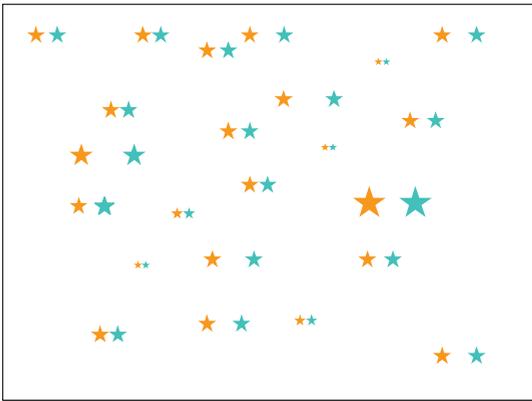
2. Recorta por las líneas continuas y dobla por la línea discontinua.



3. Pega los filtros de gelatina entre las dos caras que forman las gafas.



4. Observa los anaglifos de esta página a través de las gafas. Debes asegurarte de que los colores estén dispuestos en el mismo orden en el anaglifo y en las gafas. Observa también otros anaglifos que puedes descargar de diversas páginas de internet.

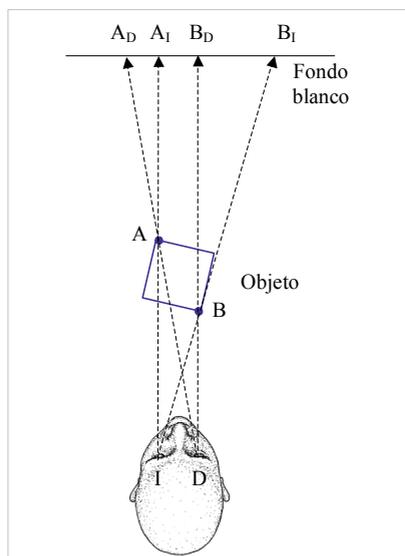


¿Qué sucede?

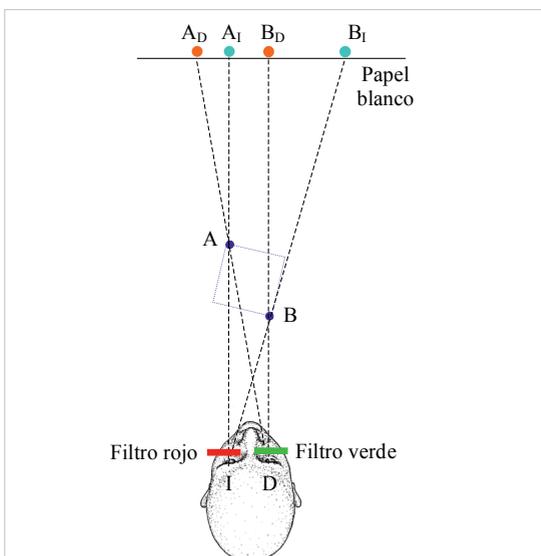
Las imágenes se observan como si tuvieran relieve, es decir, en tres dimensiones.

¿Cómo se explica?

La sensación de relieve se debe al hecho de que tenemos dos ojos. Cada uno de ellos proporciona una visión ligeramente distinta a la del otro. La fusión que realiza el cerebro de esas dos imágenes diferentes produce la sensación de relieve.



Analicemos cómo tiene lugar la visión de dos puntos A y B de un objeto por los ojos izquierdo (I) y derecho (D) de un observador. Las imágenes percibidas del punto A por el ojo izquierdo y derecho se sitúan en las posiciones A_I y A_D , respectivamente. El mismo efecto tiene lugar para el punto B; pero, al encontrarse este último más próximo al observador, las imágenes B_I y B_D están más separadas entre sí.



Consideremos ahora que en la posiciones A_I y A_D de un papel blanco se encuentran dos puntos, azul (o azul-verdoso) y rojo-naranja, respectivamente, que se observan a través de unas gafas con filtro rojo frente al ojo izquierdo y con verde (o azul) frente al ojo derecho.

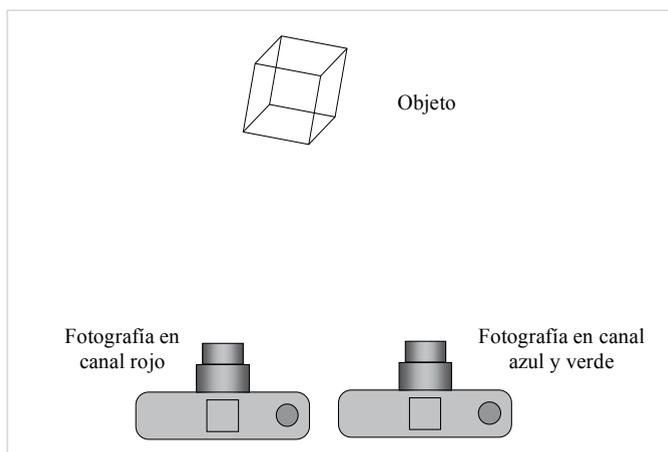
A través del *filtro rojo*, el punto A_I (azul) se ve oscuro y el punto A_D (rojo-naranja) se confunde con el filtro (es decir, no se percibe). Por el contrario, a través del *filtro verde* (o azul), el punto A_I (azul) se confunde con el filtro, mientras que el punto A_D (rojo-naranja) se ve oscuro. El resultado conduce a la percepción de un punto en la posición A del espacio.

El mismo razonamiento puede aplicarse a los puntos coloreados en azul y rojo-naranja situados en B_I y B_D , respectivamente. Esto conduce a la percepción de un punto en la posición B del espacio, más próximo al observador que el punto A.

La extensión de este proceso a todos los puntos del objeto original conlleva a la percepción de una imagen tridimensional.

Sugerencias y comentarios

Con una cámara fotográfica montada sobre un soporte deslizante, toma dos fotografías consecutivas de un objeto, desplazando la cámara una distancia comprendida entre 10 y 15 cm perpendicularmente a la línea de visión. Con un programa informático de tratamiento de imágenes se selecciona el canal rojo en la fotografía izquierda y se elimina el rojo en la derecha. Posteriormente se fusionan ambas fotografías para su observación con las gafas.



Utilizando dos lápices de colores (naranja y azul suave), realiza dibujos que puedan percibirse como imágenes tridimensionales. Para ello hay que tener en cuenta algunos criterios:

Un punto azul se percibirá por delante de la hoja de papel si se dibuja a la derecha de uno naranja, y tanto más próximo al observador cuanto mayor sea la separación entre ellos. Cuando se dibuja el punto naranja a la derecha del punto azul, se percibe un punto detrás del papel, tanto más alejado cuanto mayor es la separación entre ellos.

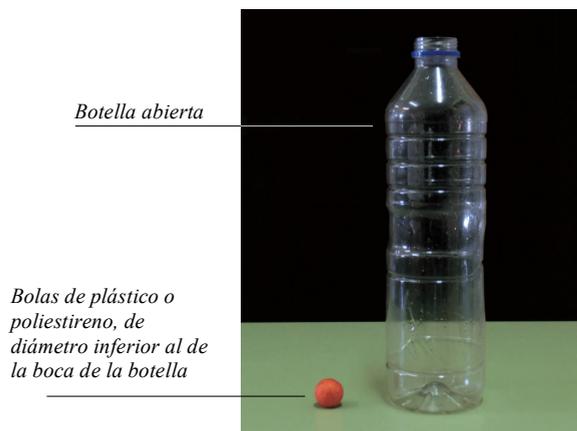
- ● Punto detrás de la hoja y lejos del observador
- ● Punto detrás de la hoja y cerca del observador
- ● Punto delante de la hoja y lejos del observador
- ● Punto delante de la hoja y cerca del observador

En internet se pueden encontrar algunas películas diseñadas para verlas en 3D, con unas gafas similares a las construidas en esta experiencia.

51. Visión plana

Mirando con un solo ojo se pierde percepción de profundidad.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Pon la botella sobre una mesa. Siéntate frente a la botella, de forma que la parte superior de la misma quede a la altura de los ojos.

Toma una bola y, situándola a unos 15 cm por encima de la botella, intenta introducirla en ella, dejándola caer libremente.

Repite el experimento cambiando la posición de la botella en la mesa. Haz de nuevo la experiencia, pero ahora con uno de los ojos tapado.



¿Qué sucede?

Normalmente, la persona con los dos ojos abiertos será capaz de introducir la bola en la botella. Sin embargo, la persona con solo uno de los ojos abierto, normalmente, no será capaz de introducir la bola en la botella.

¿Cómo se explica?

Cada ojo capta imágenes distintas pero próximas, de forma que, al enfocar ambos en la misma dirección, el cerebro percibe una única imagen con sensación de profundidad. Esta sensación de visión tridimensional se conoce como *estereopsis*. La visión monocular (visión con un único ojo) da lugar a una única imagen, por lo que, además de perder visión periférica, se pierde también la percepción de profundidad. Las personas con visión monocular aprenden trucos para compensar la pérdida de esta percepción. En la primera parte del experimento, la persona con visión binocular es capaz de situar la bola encima de la botella. En la segunda parte del experimento, la persona con un ojo tapado tiene dificultades para colocar la bola justo encima de la botella, siempre y cuando no disponga de referencias que le ayuden a situarla de forma correcta.

Sugerencias y comentarios

Se pueden sustituir las bolas por un cuentagotas. También se puede realizar la experiencia que consiste en colocar los dedos índices de cada mano apuntando uno hacia el otro, a cierta distancia de la cara. Con ambos ojos abiertos es fácil desplazar los dedos para que sus puntas coincidan. Pero si se cierra uno de los ojos, no resulta tan sencillo desplazar los dedos para que sus puntas coincidan.

En el siglo XIX estuvo de moda el *estereoscopio*. Éste es un dispositivo binocular, inventado por Charles Wheatstone (1802-1875) en 1838, que crea la sensación de profundidad a partir de una imagen ligeramente diferente en cada ojo.

52. Falsas apariencias

Un movimiento no siempre es lo que parece.

¿Qué se necesita?

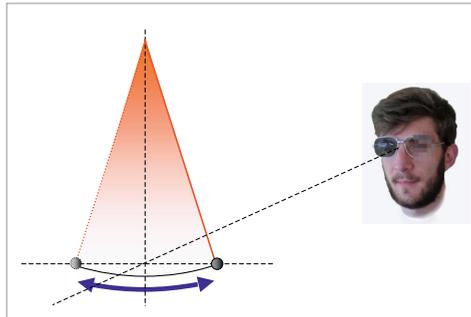
Gafas de sol sin el cristal del ojo izquierdo

Péndulo



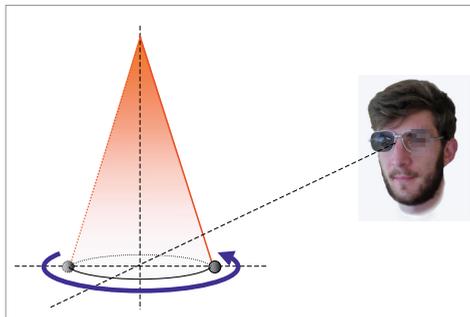
¿Qué hay que hacer?

Ponte las gafas y mira el péndulo, que otra persona hace oscilar en un plano perpendicular al de tu línea visual.



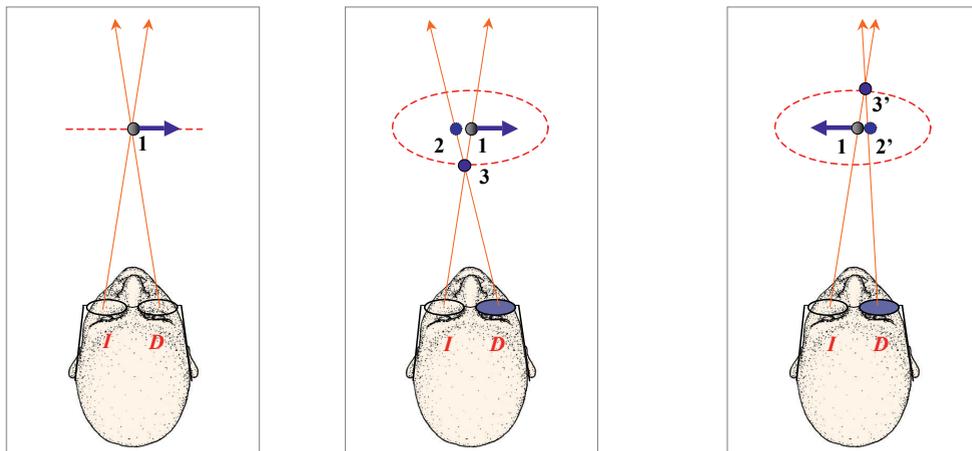
¿Qué sucede?

El observador percibe que el péndulo describe una trayectoria elíptica.



¿Cómo se explica?

La explicación aceptada es que una reducción en la iluminación de la retina provoca un retardo en la transmisión de la señal al cerebro. Los fotorreceptores del ojo cubierto necesitan más tiempo para registrar la señal y enviarla al cerebro. Así pues, debido a la diferencia relativa de la señal que llega a cada ojo, el cerebro interpreta el movimiento como si tuviera una componente de profundidad. El fenómeno se conoce como *efecto Pulfrich*.*

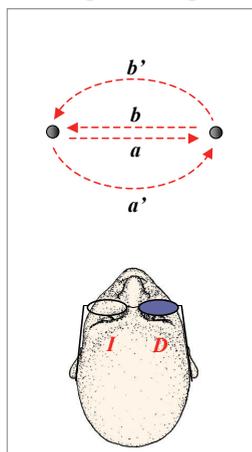


Si un cuerpo en movimiento se encuentra en la posición **1** y los dos ojos reciben la misma iluminación, el cerebro sitúa el cuerpo en la misma posición **1**. La línea roja discontinua representa la trayectoria percibida por el observador.

Si un cuerpo en movimiento se encuentra en la posición **1** y el ojo izquierdo lo percibe con alta luminosidad, el cerebro lo sitúa también en la posición **1**.

Si el ojo derecho lo percibe con baja luminosidad, debido al efecto Pulfrich, responde con retraso y sitúa el cuerpo en las posiciones **2** y **2'**, respectivamente. Por tanto, el cerebro percibe el cuerpo, aparentemente, en las posiciones **3** y **3'**, respectivamente. La elipse de color rojo discontinua representa la trayectoria percibida por el observador.

En consecuencia, el movimiento de un péndulo que describe las trayectorias de ida y vuelta **a** y **b**, es percibido como si describiera aparentemente las trayectorias **a'** y **b'**.



* Descubierto por Carl Pulfrich (1858-1927).

Sugerencias y comentarios

Utiliza estas gafas para observar imágenes de televisión en las que existan objetos en movimiento. Dependiendo del sentido de este movimiento, los objetos pueden percibirse situados delante o detrás de la pantalla, lo que produce cierta sensación de tridimensionalidad.

El uso de gafas de cartón con dos filtros, claro para el ojo izquierdo y oscuro para el derecho, se ha utilizado en alguna ocasión para programas televisivos con muchas escenas de acción.

53. Objetos pseudotridimensionales

Manipulando la perspectiva, las imágenes planas pueden percibirse como objetos tridimensionales.

¿Qué se necesita?

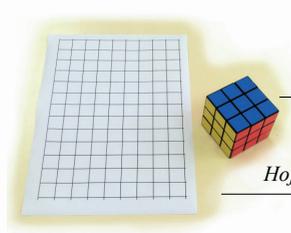
*Cámara
fotográfica*

Tripode

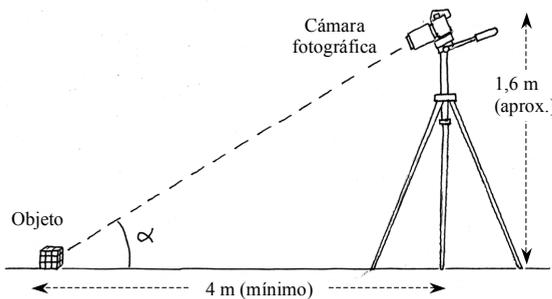


*Objeto
tridimensional*

Hoja de papel con cuadrícula

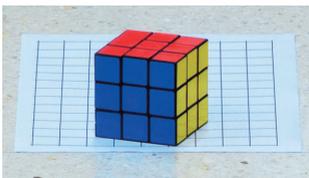


¿Qué hay que hacer?



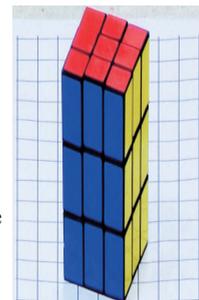
Coloca la cámara fotográfica en el trípode, de modo que su altura sobre el suelo sea de 1,6 m, aproximadamente.

En un lugar bien iluminado, sitúa el objeto en el suelo, sobre la hoja de papel cuadrículado, a una distancia del trípode no inferior a 4 metros.



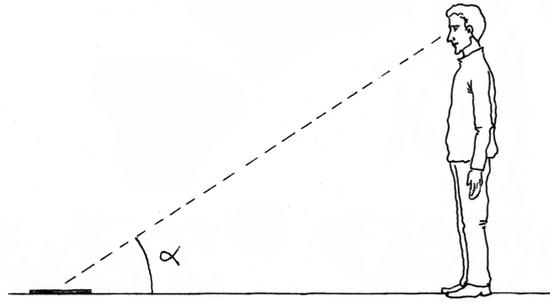
Utilizando el zoom, fotografía la hoja con el objeto, de modo que su imagen ocupe prácticamente la totalidad de la pantalla de la cámara.

Con un programa de tratamiento de imágenes, modifica la fotografía, de modo que la cuadrícula del papel recupere las proporciones y tamaño originales. Cuando se hace esto, la imagen del objeto queda deformada.





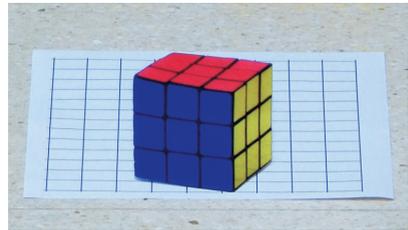
Imprime la fotografía y recorta la imagen del objeto.



Coloca la imagen recortada en el lugar que ocupaba inicialmente el objeto y sitúate en la misma posición que ocupaba la cámara.

¿Qué sucede?

El observador percibe una imagen idéntica a la que producía el objeto.



¿Cómo se explica?

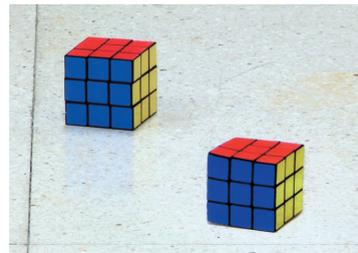
Una imagen plana es percibida por el cerebro como un objeto tridimensional, debido a que aplica reglas de perspectiva análogas a las que se utilizan en dibujo para conseguir la apariencia tridimensional.

Sugerencias y comentarios

Sitúa el objeto original y su imagen plana al lado. Intenta diferenciarlos desde la posición del observador.

Realiza la observación con un solo ojo, a fin de limitar el efecto de la visión binocular.

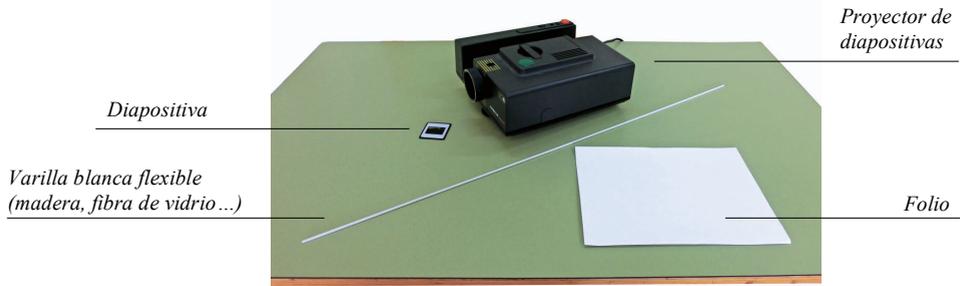
El procedimiento descrito se asemeja (con ciertas diferencias, pues no se ha considerado la deformación producida por la perspectiva) al empleado para obtener *figuras anamórficas*. Éstas aparecen deformadas para que no puedan ser reconocidas a simple vista; pero recuperan su aspecto natural cuando se observan desde un determinado ángulo (o a través de un espejo cilíndrico o cónico, aunque este no es el caso que nos ocupa). Las señales sobre la carretera (dibujo de bicicleta, palabra “stop”...) no se ven igual desde arriba (un helicóptero, por ejemplo) o desde la posición de un conductor. En internet pueden encontrarse programas para obtener figuras anamórficas a partir de una imagen dada.



54. Proyección de una imagen en el aire

Para ver una imagen no necesitamos pantalla.

¿Qué se necesita?

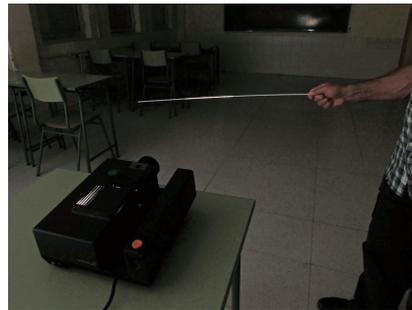


¿Qué hay que hacer?

1. Coloca la diapositiva en el proyector, apaga la luz y enfoca la imagen sobre un folio, a una distancia próxima al proyector.

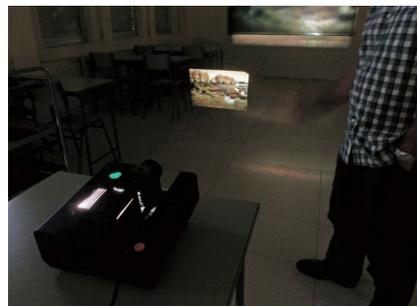


2. Retira el folio y, en la posición que ocupaba éste, sitúa una varilla blanca que cimbrarás rápidamente en un plano vertical.



¿Qué sucede?

Se observa una imagen de la diapositiva que parece encontrarse flotando en el espacio.



¿Cómo se explica?

Sobre cada posición de la varilla se proyecta una estrecha franja de la imagen completa. Al moverse la varilla, se proyectan sucesivamente franjas diferentes. Como el movimiento es rápido y una imagen persiste en la retina durante un tiempo comprendido entre $1/10$ s y $1/15$ s, aproximadamente, las imágenes parciales se fusionan provocando la percepción de la imagen completa.

Sugerencias y comentarios

El experimento puede realizarse utilizando un cañón de proyección en vez de un proyector de diapositivas. Para que se aprecie mejor la imagen proyectada, conviene tener en cuenta lo siguiente: la actividad ha de realizarse con poca luz ambiente, la imagen original ha de tener suficiente contraste y, por último, debe evitarse que haya un fondo claro donde se pudiera proyectar parte de la imagen (aunque sea desenfocada), ya que eso descubriría la imagen antes de verla flotando en el espacio.

Se puede variar la velocidad con que se cimbreo la varilla (comenzando lentamente), para comprobar que hasta que no vibra con cierta rapidez, no se percibe la imagen de la diapositiva.

A continuación se describe cómo realizar una versión 3D de esta actividad. Si un círculo blanco en un fondo negro se proyecta sobre una pantalla de porexpan (o cartón blanco duro) que se mueve acercándose y alejándose del proyector (como si lo estuviera abanicando), se percibirá un cilindro blanco horizontal flotando en el espacio.

55. Visiones intermitentes (I)

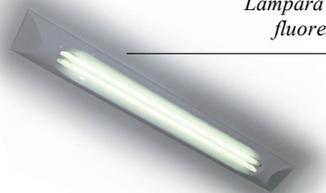
Una lámpara fluorescente no emite luz de forma continua. En realidad se enciende y apaga a un ritmo que el ojo humano no es capaz de seguir en condiciones ordinarias.

¿Qué se necesita?

Varilla blanca



Lámpara de luz fluorescente

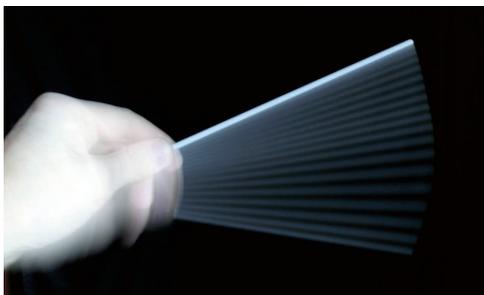


¿Qué hay que hacer?

Cimbrea periódicamente la varilla con la mano y obsérvala sobre fondo oscuro en un lugar iluminado exclusivamente con luz fluorescente.

¿Qué sucede?

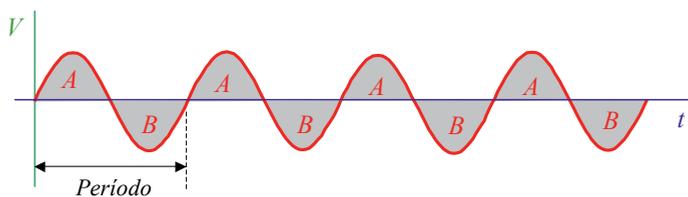
La trayectoria de la varilla se ve de forma discontinua, con bandas claras y oscuras.



¿Cómo se explica?

Un tubo fluorescente contiene una pequeña cantidad de vapor de mercurio y de un gas noble a baja presión. Para una determinada diferencia de potencial entre sus electrodos se produce una descarga eléctrica que emite principalmente luz ultravioleta. Un material fluorescente que recubre el interior del tubo transforma la luz ultravioleta en luz visible.

La corriente eléctrica que se utiliza en las viviendas es alterna, lo que significa que los electrones cambian periódicamente de sentido un determinado número de veces cada segundo.



La representación gráfica de la diferencia de potencial V frente al tiempo t es una curva sinusoidal. El tiempo correspondiente a un ciclo es el *período*, cuya duración es de $1/50$ de segundo, por lo que tienen lugar 50 ciclos en un segundo y se dice que la corriente alterna es de 50 hercios (Hz).

Tanto en el semiciclo A como en el B se produce descarga a través del tubo fluorescente, pero en el tránsito de un semiciclo a otro la diferencia de potencial es cero y en ese instante el tubo no emite luz. En consecuencia, el tubo se enciende y apaga 100 veces cada segundo.*

El tiempo de encendido y apagado es más corto que el tiempo que las imágenes persisten en la retina, que está comprendido entre $1/10$ s y $1/15$ s, aproximadamente. Por este motivo, los lugares iluminados con luz fluorescente son percibidos por el ojo como si la iluminación fuese continua.

Durante el movimiento de la varilla, algunas de sus posiciones se corresponden con la máxima iluminación del tubo y otras con los instantes en que el tubo está apagado. Esto genera una secuencia de imágenes donde la varilla aparece iluminada en esas posiciones, con zonas oscuras entre ellas.

Sugerencias y comentarios

Puede determinarse la frecuencia de la corriente alterna utilizando una cámara fotográfica, procediendo tal como se explica a continuación.

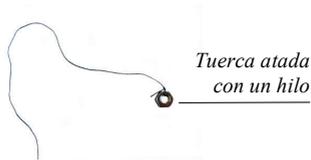
Se fotografía la varilla en movimiento con una cámara en la que el tiempo de exposición es de $1/10$ de segundo, observándose entonces en la fotografía 10 bandas alternas. Esto significa que la duración de cada semiciclo es de $1/100$ de segundo y la frecuencia es, por lo tanto, de 50 Hz. El parpadeo del tubo fluorescente también puede detectarse en las grabaciones realizadas con una cámara digital, donde se observa que la iluminación varía periódicamente. Si aumenta el ritmo de fotogramas por segundo con el que se realiza la grabación, al reproducir la secuencia a cámara lenta se notan mejor las variaciones en la intensidad de la iluminación.

* Lo dicho sólo es válido para los tubos fluorescentes convencionales. Las lámparas de bajo consumo, que también son fluorescentes, tienen un circuito electrónico que las hace funcionar a frecuencias superiores a 20 kHz.

56. Visiones intermitentes (II)

En las pantallas de rayos catódicos un haz de electrones barre la pantalla horizontalmente con cierta frecuencia. Aunque nuestra vista percibe una pantalla iluminada de forma permanente, en realidad se está encendiendo y apagando continuamente.

¿Qué se necesita?



Tuerca atada con un hilo

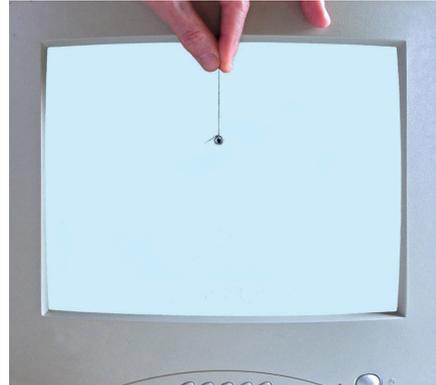
Pantalla de rayos catódicos



¿Qué hay que hacer?

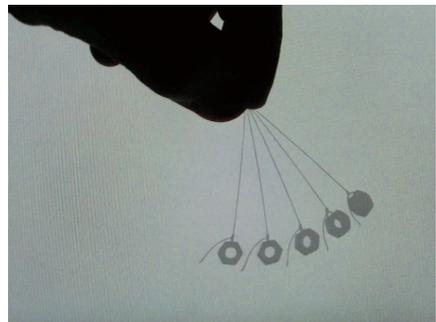
Enciende el ordenador con pantalla de rayos catódicos y elige una presentación que ofrezca una pantalla uniformemente iluminada de cualquier color.

Con dos dedos sujeta el hilo, de modo que la tuerca pueda oscilar libremente, como un péndulo. Pon el conjunto frente a la pantalla iluminada, apaga la luz de la habitación y haz oscilar el hilo con la tuerca.



¿Qué sucede?

Sobre la pantalla se observan posiciones diferenciadas del hilo con la tuerca.



¿Cómo se explica?

En un tubo de rayos catódicos el haz de electrones barre la pantalla a razón de 50 veces por segundo.* Ello supone que cada elemento de pantalla se ilumina y apaga (es decir, se refresca) también 50 veces por segundo. Como este valor es superior a la frecuencia con que el ojo humano puede discriminar imágenes, que en promedio está comprendido entre 10 y 15 imágenes por segundo, a efectos prácticos la luz emitida por el monitor se comporta de forma parecida a una *luz estroboscópica*.

La imagen muestra la fotografía de una pantalla tomada con una velocidad de obturación relativamente rápida, en la cual se aprecia el barrido del haz de electrones como una ancha franja iluminada.

Cuando el péndulo se mueve frente a la pantalla, algunas de sus posiciones coinciden con la iluminación de la pantalla y otras con el apagado. Esto da lugar a una percepción entrecortada del movimiento de ese péndulo, que será visible sólo en los instantes en que esté iluminado.



Sugerencias y comentarios

Es posible observar el mismo efecto desplazando un dedo o cualquier objeto, preferiblemente estrecho, sobre la pantalla iluminada. Resulta muy vistoso colocar un diapasón de 100 Hz delante del monitor y ver cómo los extremos de la horquilla se mueven suavemente; la oscilación real es más rápida, pero la iluminación estroboscópica del monitor parece ralentizar el movimiento.

Si se provoca una vibración en una goma tensa colocada verticalmente delante del monitor, se observarán unas curiosas ondulaciones, cuya forma cambiará si se varía la tensión de la goma.

* Esta frecuencia es meramente indicativa, puesto que la frecuencia de refresco puede modificarse (por los fabricantes o los usuarios, dentro de los márgenes permitidos por cada aparato) para que el espectador no aprecie un parpadeo molesto.

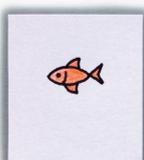
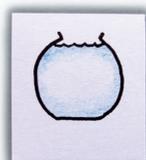
57. Taumátropo

Como pez en el agua.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



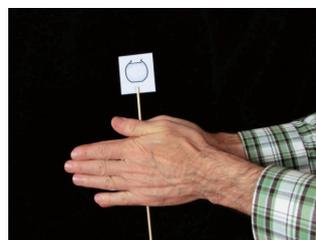
Diseña una figura que pueda separarse fácilmente en dos motivos diferentes.

En cada cara de la cartulina dibuja uno de los motivos, manteniendo las posiciones relativas de ambas partes. Emplea colores suaves, especialmente para el motivo que aparece como fondo del dibujo completo (en este caso, la pecera).

Con ayuda del cúter realiza un corte longitudinal en el extremo ancho del palillo, de aproximadamente, 1 cm de longitud.

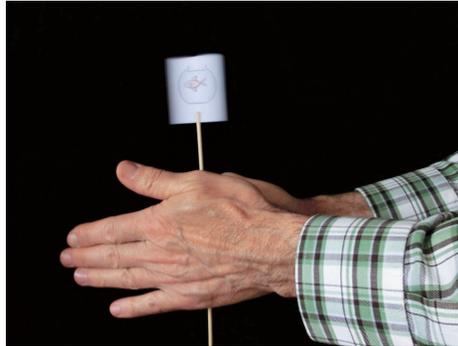
Introduce la cartulina en ese corte, convenientemente centrado, y fíjalo con pegamento.

Sitúa el palo entre las palmas de las manos y hazlo girar desplazando rápidamente una mano respecto de la otra. Observa la cartulina mientras gira.



¿Qué sucede?

Durante el giro se observa que las imágenes parciales se superponen y forman la figura completa.



¿Cómo se explica?

Un *taumátropo* suele ser un disco (u otra forma geométrica plana) con dos imágenes, una por cada cara, que al girar rápidamente provoca la superposición visual de las mismas. Se basa en la persistencia de las imágenes en la retina.

Una imagen persiste en la retina durante un tiempo comprendido entre $1/10$ s y $1/15$ s, aproximadamente. Si dos imágenes se proyectan en la retina con un intervalo inferior a ese tiempo de persistencia (que en nuestro caso depende de la velocidad de giro), las mismas se superponen provocando la percepción de una sola imagen.

Sugerencias y comentarios

Comprueba la influencia de la velocidad de giro en la percepción de la imagen final.

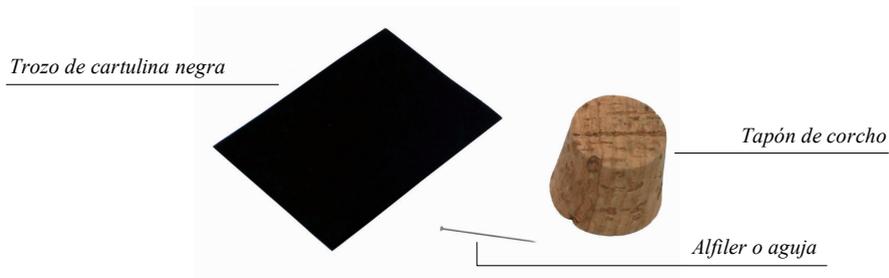
Otra forma de construir un taumátropo consiste en dibujar las figuras sobre un disco, con dos cuerdas (o gomas) unidas a su borde por puntos diametralmente opuestos. En este caso, hay que tener la precaución de colocar las figuras invertidas una respecto de la otra, para que se recomponga correctamente la figura cuando se hace girar el disco horizontalmente, sosteniendo las cuerdas con los dedos de cada mano.

El invento del taumátropo se suele atribuir a John Ayrton Paris (1785-1856), quien lo habría construido para demostrar el principio de persistencia retiniana ante el Real Colegio de Médicos de Londres, en 1824. En aquella ocasión, utilizó tres discos en los que se veía: un jinete sobre un caballo, un hombre calvo con peluca y un pájaro en su jaula.

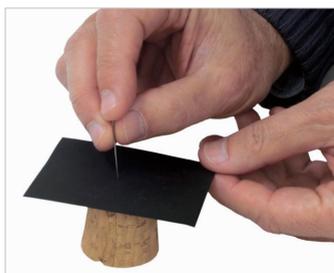
58. Mirando por un agujero

La visión de un miope sin gafas mejora si mira por un agujero pequeño.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Con el alfiler o aguja se realiza un agujero en la cartulina, que se sostiene apoyada en el tapón de corcho.

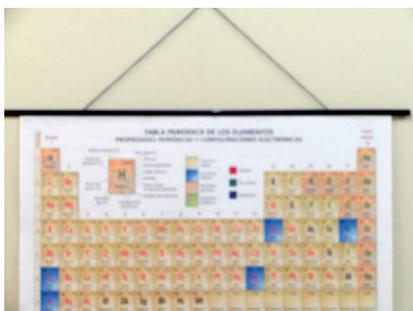


Una persona miope se sitúa frente a un cartel o superficie impresa con letras que no sea capaz de leer sin gafas.

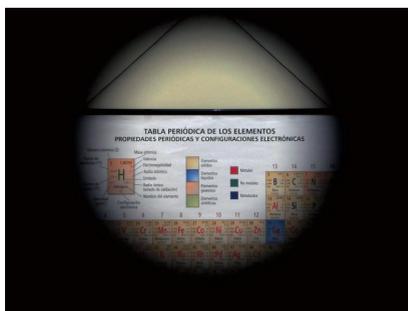
Sin las gafas y con un ojo cerrado, observa con el otro ojo el cartel a través del agujero de la cartulina, situada muy próxima al ojo.

¿Qué sucede?

La persona miope es capaz de leer las letras que no distinguía sin gafas.



Visión sin gafas.



Visión a través del agujero.

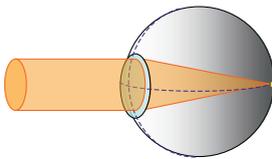
¿Cómo se explica?

Los rayos de luz procedentes de un punto lejano, después de pasar por el cristalino convergen en el foco de éste.

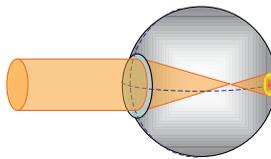
En un ojo normal, este foco se sitúa en la retina. Sin embargo, en un ojo miope el foco se encuentra antes de la retina, por lo que los rayos, al continuar hasta la retina, forman una imagen difusa del punto.

Al colocar la cartulina con agujero frente al ojo, el haz de rayos que atraviesa el cristalino es más estrecho que en ausencia del agujero, lo que reduce el tamaño de la mancha sobre la retina, y también la luminosidad general de la imagen.

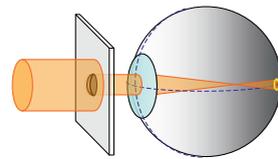
Este fenómeno se denomina *efecto estenopeico* (de *stenos*, estrecho, y *ope*, agujero).



En un ojo normal los rayos que llegan de un punto lejano (casi paralelos) convergen en la retina, donde forman una imagen puntual.



En un ojo miope los rayos paralelos convergen antes de alcanzar la retina y forman en ésta, finalmente, una imagen no puntual.



Aunque el ojo es miope, el agujero reduce el diámetro del haz luminoso y del cono de luz. La imagen resulta casi puntual.

Sugerencias y comentarios

Realiza el mismo experimento observando a través de agujeros de diferentes diámetros.

Si el agujero tiene demasiado diámetro, el haz de rayos no es lo suficientemente estrecho, por lo que la mancha en la retina es relativamente grande y la visión apenas mejora. Si el agujero tiene un diámetro excesivamente pequeño, la imagen empeora por la difracción de la luz a través del agujero.

Un pequeño orificio como el descrito en esta experiencia también amplía la imagen de un objeto muy próximo (las letras pequeñas de un documento, por ejemplo) y mejora la imagen que observa una persona hipermetrope de un objeto cercano.

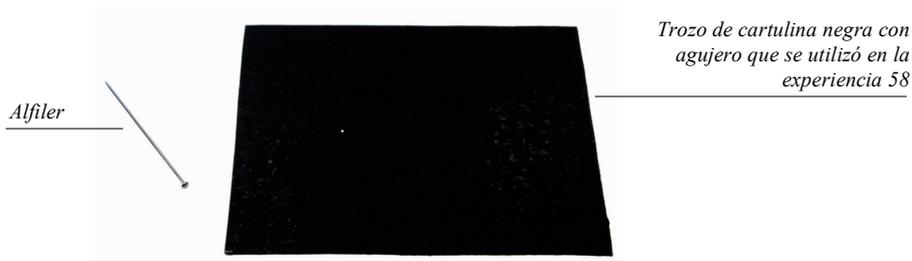
Basándose en el efecto estenopeico, se han comercializado las llamadas *gafas estenopeicas*, que tienen multitud de pequeños orificios sobre una superficie opaca, en lugar de las lentes correctoras. Por supuesto, estas gafas no corrigen ningún defecto de la visión y su uso debe restringirse al puro entretenimiento científico.

Puede realizarse un pequeño orificio instantáneamente, y sin necesidad de ningún material específico, juntando los dedos índice y pulgar de cada mano y colocándolos frente a los de la otra, plegando el dedo índice... o de cualquier otra forma que se le ocurra al lector.

59. La sombra del alfiler

El cerebro invierte las imágenes que llegan a la retina.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

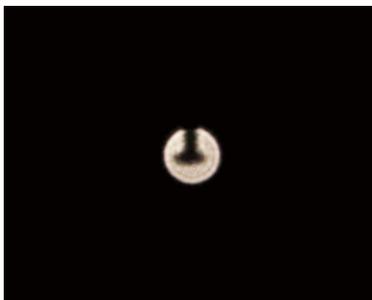
Utiliza el alfiler para hacer un agujero en el centro de la cartulina.

Colócate enfrente de una ventana con buena luz. Sitúa el alfiler, con la cabeza hacia arriba, justo enfrente de uno de los ojos (el otro ojo se mantiene cerrado) a unos 2 cm de distancia. Con la otra mano sujeta la cartulina, a una distancia comprendida entre 5 y 10 cm del ojo, de forma que el ojo, la cabeza del alfiler y el agujero de la cartulina estén exactamente alineados.



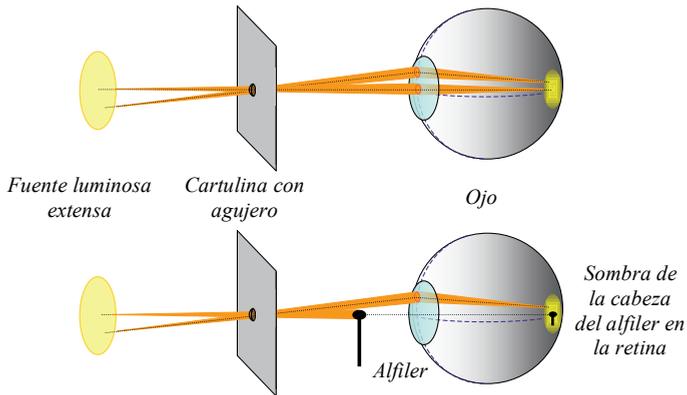
¿Qué sucede?

Se observa la cabeza del alfiler justo en el agujero de la cartulina, pero invertida respecto a su posición en la mano. Si desplazas el alfiler horizontalmente en un sentido, observarás a través del agujero que se mueve en el sentido contrario.



¿Cómo se explica?

El agujero de la cartulina deja pasar un pequeño haz de luz colimada que llega a nuestra retina. El alfiler intercepta parcialmente este haz de luz, provocando una sombra justo en la parte inferior de la imagen que el agujero forma en la retina. Esta sombra tiene la cabeza hacia arriba. Puesto que el cerebro invierte la imagen, en la que se forma del agujero luminoso percibimos la sombra del alfiler con la cabeza hacia abajo. La figura adjunta ayuda a explicar este fenómeno. Una explicación análoga se aplica para justificar la percepción del movimiento en el sentido contrario.



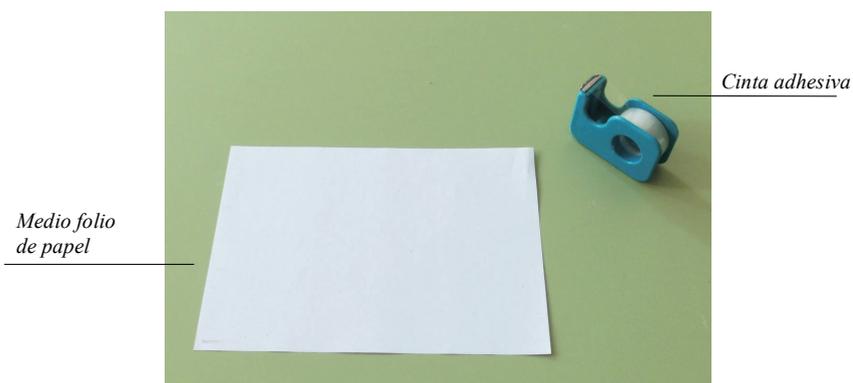
Sugerencias y comentarios

Se puede repetir el experimento colocando la aguja en diferentes posiciones (con la cabeza hacia abajo o hacia la izquierda). Se puede observar que con agujeros cada vez más grandes la sombra del alfiler se va difuminando hasta llegar a desaparecer.

60. Un agujero en la mano

El cerebro trabaja fusionando las imágenes que llegan a cada ojo para proporcionar la sensación de una única imagen.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?



Enrolla el papel para construir un cilindro hueco, de cuatro a cinco centímetros de diámetro. Sujétalo con un poco de cinta adhesiva.



Toma el cilindro de papel con una mano y colócalo delante de uno de los ojos. Sitúa la otra mano enfrente del otro ojo, junto a la mitad del cilindro y con la palma mirando hacia la cara. Mantén abiertos ambos ojos y mira, a través del cilindro, algún objeto enfrente del observador.

¿Qué sucede?

El objeto elegido, en este caso un extintor de pared, se contempla a través de un agujero en la mano enfrentada al otro ojo.



¿Cómo se explica?

Los dos ojos permiten una visión binocular del entorno. Cada ojo recibe una imagen que transmite al cerebro, el cual las fusiona para proporcionar la sensación de una única imagen. Un ojo percibe la imagen que le llega a través del cilindro, mientras que el otro percibe la imagen de la palma de la mano. La fusión de ambas lleva a la percepción de un agujero en la mano, a través del cual vemos el objeto seleccionado con el cilindro.

Sugerencias y comentarios

Se pueden utilizar cilindros de diferentes diámetros. También se puede interponer otro objeto, en lugar de la mano.

Si el agujero no se percibe inmediatamente, conviene tener un poco de paciencia y relajar la vista (observando un objeto lejano).

61. Viendo el infrarrojo

Con ayuda de un teléfono móvil o una cámara digital, se puede detectar luz infrarroja.

¿Qué se necesita?



¿Qué hay que hacer?

Caso 1

Mientras examinas la parte delantera del mando a distancia pulsa cualquiera de sus botones.

Caso 2

Realiza la misma operación que en el caso 1, examinando la parte delantera del mando a través de la cámara del teléfono móvil.

¿Qué sucede?

En el **caso 1**, no se observa en el mando nada especial.



En el **caso 2**, a través de la pantalla del móvil se observa una luz en el mando.



¿Cómo se explica?

El ojo humano es sensible a las radiaciones electromagnéticas con longitud de onda comprendida entre 400 nm y 700 nm, aproximadamente. Este intervalo se denomina *espectro visible*.

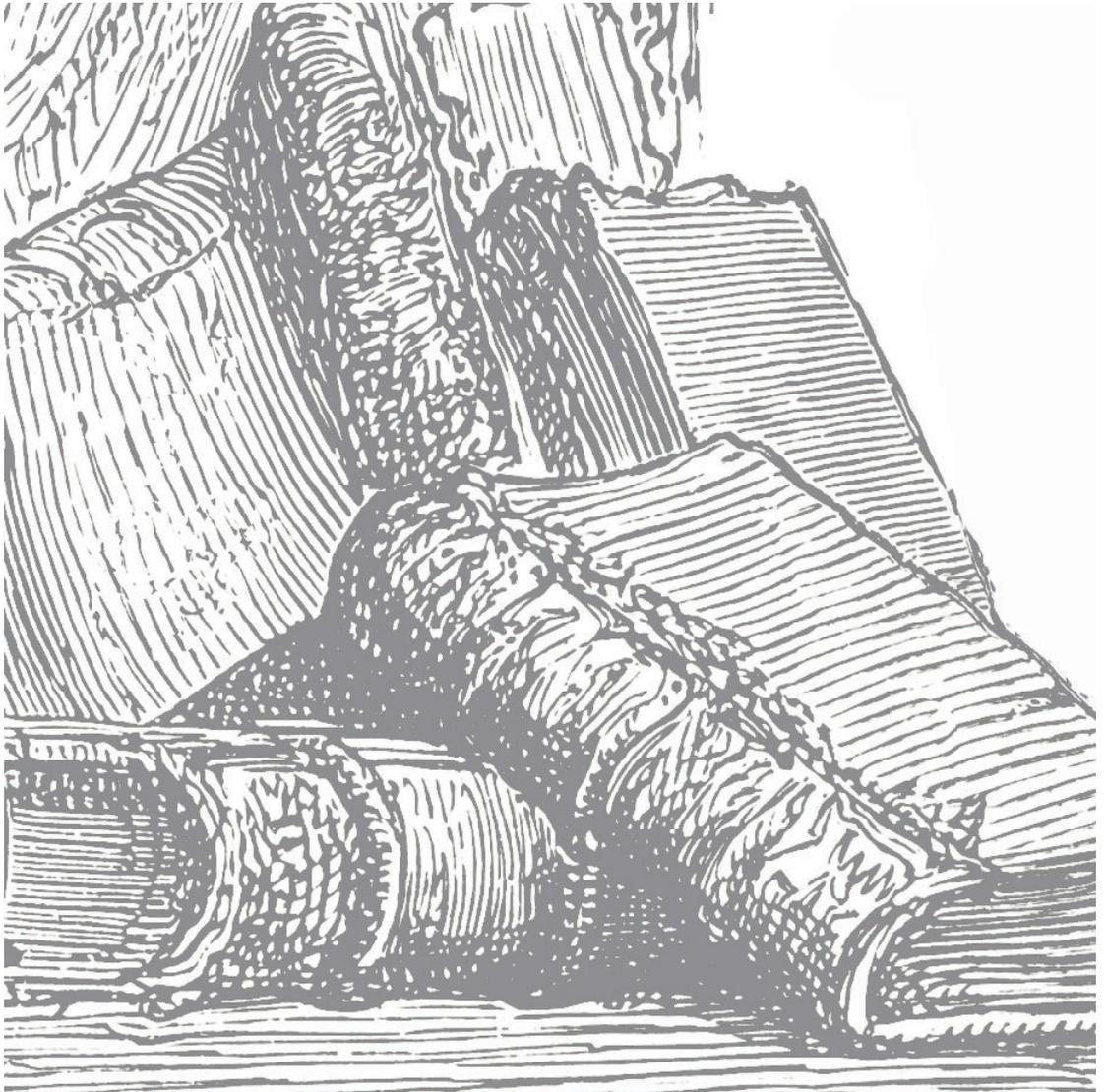
Un mando a distancia funciona con radiación infrarroja emitida por un led, cuya longitud de onda se encuentra por encima de 750 nm. Por ello, el ojo humano no es capaz de percibir luz de dicho led cuando se aprieta un botón del mando. Sin embargo, los sensores de las cámaras digitales son sensibles también a la radiación infrarroja. En consecuencia, al observar el mando a través de la pantalla de la cámara se ve el led iluminado.

Sugerencias y comentarios

El experimento se puede realizar igualmente haciendo uso de una cámara fotográfica digital.

La luz infrarroja experimenta los mismos fenómenos (reflexión, refracción, difracción, interferencia...) que el resto del espectro electromagnético. Emplea una cámara digital para observar la luz infrarroja reflejada en un espejo, difractada por un CD, etc.

Bibliografía



El propósito de esta relación bibliográfica es doble. Por una parte, se presenta una selección de recursos bibliográficos donde encontrar detalles (técnicos, formales...) que no se han incluido en el desarrollo de cada experimento, dadas las limitaciones de espacio que impone el formato empleado. Por otra parte, sirve para que los lectores descubran la existencia de otras fuentes de información, además de internet, donde profesionales de la enseñanza y la divulgación de las ciencias exponen sus trabajos.

Con las referencias bibliográficas que aparecen en esta sección no se pretende abarcar todo el contenido de este libro, pues ello resultaría una tarea ardua, además de ser prácticamente imposible. Pero con ellas sí que se aspira a despertar la curiosidad por consultar otras fuentes documentales y, de esta forma, contribuir a la mejora de las actividades experimentales propuestas, así como al desarrollo de otras nuevas.

Las revistas científicas son excelentes recursos bibliográficos para estar al día y documentarse sobre la preparación de experimentos de física. Las revistas que por su contenido y nivel mejor se adaptan a las experiencias de este libro son las siguientes (por orden alfabético):

Alambique, *Didáctica de las Ciencias Experimentales*, *American Journal of Physics*, *European Journal of Physics*, *Investigación y Ciencia*, *Latin American Journal of Physics Education*, *Physics Education*, *Revista Española de Física*, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* y *The Physics Teacher*.

Para mayor comodidad en la consulta, se han agrupado las referencias bibliográficas según su temática, precedidas de una selección bibliográfica de carácter general.

1. Ondas

Cualquier libro de física general (dependiendo de la profundidad con la que se desee tratar cada tema) contiene los fundamentos básicos relacionados con las ondas, tanto sonoras como luminosas.

Los documentos de este apartado presentan recopilaciones de experimentos (con secciones específicas dedicadas a la audición y la visión) de características similares a los expuestos en este libro. También se han añadido algunos artículos cuyo contenido es menos específico que el de las siguientes secciones.

- Cortel A. (1997) *Las ondas. La luz y el sonido*. Barcelona: Horsori - ICE Universitat de Barcelona.
- DiSpezio M. (1999) *Awesome experiments in light and sound*. New York: Sterling Publishing.
- Edge R. D. (2002) *Experimentos con hilos y cinta adhesiva*. College Park, MD: American Physical Society-American Association of Physics Teachers (con la colaboración de la Sociedad Mexicana de Física).
- Estalella J. (1918) *Ciencia recreativa. Enigmas y problemas, observaciones y experimentos, trabajos de habilidad y paciencia*. Barcelona: Gustavo Gili. (En 2008 se editó una copia en facsímil, acompañada de comentarios actuales: *Ciencia recreativa. Facsímil y comentarios*. Murcia: Fundación Séneca).
- Ehrlich R. (1990) *Turning the world inside out, and 174 other simple physics demonstrations*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

- Ehrlich R. (1997) *Why toast lands jelly-side down?* Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Exploratorium Teacher Institute (1991) *Science Snackbook*. San Francisco: The Exploratorium.
- Gardner M. (1981) *Entertaining science experiments with everyday objects*. New York: Dover.
- Gluck P. (2008) Experiments for a special day. *Physics Education* **43**, 189.
- Goto H. (2009) Moiré patterns allow us to visualize the interference between propagating waves. *Physics Education* **44**, 338.
- Huggins E. (2008) Speed of wave pulses in Hooke's law media. *The Physics Teacher* **46**, 142.
- Meiners H. F. (1970) *Physics demonstration experiments*, 2 vols. New York: The Ronald Press Company.
- Perelman Y. (1971) *Física recreativa*. Barcelona: Martínez Roca.
- Sprott J. C. (1996) *Physics Demonstrations. A Sourcebook for Teachers of Physics*. Madison, WI: University of Wisconsin Press.
- Sutton R. M. (1938) *Demonstration experiments in Physics*. New York: McGraw-Hill.
- VanCleave J. (1997) *Física para niños y jóvenes. 101 experimentos superdivertidos*. México: LIMUSA, Noriega Editores.
- Velasco S., del Mazo A., Santos M. J. (2012) *Experimenta: 60 experimentos con materiales sencillos*. Salamanca: Fundación 3CIEN/Instituto ECYT.

2. Oír

- Bonard J.M. (2001) The physicist's guide to the orchestra. *European Journal of Physics* **22**, 89.
- Campbell D. M. (2014) Evaluating musical instruments. *Physics Today* **67**, 35.
- Chen Y.Y. (2005) Why does water change the pitch of a singing wineglass the way it does? *American Journal of Physics* **73**, 1045.
- Fletcher H. (1946) The pitch, loudness and quality of musical tones. A demonstration lecture introducing the new tone synthesizer. *American Journal of Physics* **14**, 215.
- French A. P. (1983) In vino veritas: A study of wineglass acoustics. *American Journal of Physics* **51**, 688.
- Ganci A., Ganci S. (2010) A measure of g : in search of simplicity. *Physics Education* **45**, 223.
- García Molina R. (2013) Concierto de copas y botellas. Simple+mente física núm. 165 <http://bohr.inf.um.es/miembros/rgm/s+mf/165s+mf.pdf>
- Gardner M. D. (2009) An investigation of Rubens flame tube resonances. *The Journal of the Acoustical Society of America* **125**, 1285.
- Gluck P., Ben-Sultan S., Dinur T. (2006) Resonance in flasks and pipes. *The Physics Teacher* **44**, 10.
- Grope J. (2011) The hope of Audacity (to teach acoustics). *The Physics Teacher* **49**, 99.
- Hall D. E. (1989) Sacrificing a cheap guitar in the name of science. *The Physics Teacher* **27**, 673.
- Inman F. W. (2006) A standing-wave experiment with a guitar. *The Physics Teacher* **44**, 465.
- Iranzo S., Mosoriu J. A., Giménez M. H., Cuador J. Q., Castro-Palacio J. C., Giménez F. (2014) Cómo fabricar un ecualizador de propano para la visualización de ondas acústicas. *Revista Española de Física* **28**, 36.

- Kasar M. K., Yurumezoglu K., Sengoren S. K. (2012) Teaching the concept of resonance with the help of a classical guitar. *The Physics Teacher* **50**, 558.
- Kraftmakher Y. (2010) Standing sound waves in air with DataStudio. *The Physics Teacher* **48**, 122.
- Kuhn J., Vogt P. (2013) Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone. *The Physics Teacher* **51**, 118.
- Lapp D. R. (2002) *The physics of music and musical instruments*. Medford, MA: Wright Center for Science Education Tufts University.
- LoPresto M. (2005) Measuring end correction for a quarter-wave tube. *The Physics Teacher* **43**, 380.
- LoPresto M. (2011) Experimenting with end-correction and the speed of sound. *Physics Education* **46**, 437.
- LoPresto M. (2011) Illustrating superposition of waves and Fourier analysis with tuning forks and MacScope II. *American Journal of Physics* **79**, 552.
- LoPresto M. (2012) Experimenting with string musical instruments. *Physics Education* **47**, 227.
- Matar M., Welti R. (2009) Capturando la física de los resonadores Helmholtz con la ecuación de ondas acústica. *Latin American Journal of Physics Education* **3**, 127.
- Merino J. M. (2006) *Las vibraciones de la música*. San Vicente del Raspeig: Editorial Club Universitario.
- Rossing T. D. (1990) Wine glasses, bell modes, and Lord Rayleigh. *The Physics Teacher* **28**, 582.
- Rossing T. D., Russell D. A., Brown D. E. (1992) On the acoustics of tuning forks. *American Journal of Physics* **60**, 620.
- Russell D. A. (2000) On the sound field radiated by a tuning fork. *American Journal of Physics* **68**, 1139.
- Ruiz M. (2014) Boomwhackers and end-pipe corrections. *The Physics Teacher* **52**, 73.
- Thomas D. C., Gee K. L., Turley R. S. (2009) A balloon lens: Acoustic scattering from a penetrable sphere. *American Journal of Physics* **77**, 197.
- Velasco S., Román F. L., White J. A. (2010) A simple experiment for measuring bar longitudinal and flexural vibration frequencies. *American Journal of Physics* **78**, 1429.
- Vogt P., Kuhn J. (2012) Determining the speed of sound with stereo headphones. *The Physics Teacher* **50**, 308.
- VVAA (2000) *Acústica musical*. Temas IyC, núm. 21. Barcelona: Prensa Científica.
- VVAA (2010) Comunicación y sonido. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales* **64** (número monográfico).
- White J. A., Medina A., Román F. L., Velasco S. (2007) A measurement of g listening to falling balls. *The Physics Teacher* **45**, 175.

3. Ver

- Alley R. E. (1980) The camera obscura in science and art. *The Physics Teacher* **18**, 632.
- Barrio J. (2011) La complejidad de las mezclas sustractivas y su predicción a partir del análisis espectral. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **8**, 427.
- Brody B. (1994) Yellow. *The Physics Teacher* **32**, 220.
- Brody B. (1994) Bright pink. *The Physics Teacher* **32**, 221.
- Cepic M., Blagotinsek A. G., Razpet N. (2008) Looking through pinhole glasses with a digital camera. *The Physics Teacher* **46**, 186.
- Colicchia G., Hopf M., Wiesner H., Zollman D. (2008) Pinhole glasses. *The Physics Teacher* **46**, 26.

- Cortel A. (2004) Simple experiments on perception of color using cardboard turbines. *The Physics Teacher* **42**, 377.
- Cortel A. (2005) Simple experiments on the physics of vision: the retina. *Physics Education* **40**, 325.
- Cortel A. (2004) La física de la visión. Experiencias de percepción visual. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales* **39**, 93.
- Curry S. M., Schawlow A. L. (1974) Measuring the diameter of a hair by diffraction. *American Journal of Physics* **42**, 412.
- Fakhruddin H. (2008) Some activities with polarized light from a laptop LCD screen. *The Physics Teacher* **46**, 229.
- Gluck P. (2002) Compact disk optics. *The Physics Teacher* **40**, 468.
- Gluck P., Massalha T. (2012) Measurement of refractive index of a liquid. *The Physics Teacher* **50**, 124.
- Hirsh F. R. Jr., Thorndike E. M. (1944) On the pinhead shadow inversion phenomenon. *American Journal of Physics* **12**, 164.
- Hwu Y. P. (1977) Diffraction pattern of a hair. *American Journal of Physics* **45**, 404.
- James M. C. (2011) Optics demonstration with student eyeglasses using the inquiry method. *The Physics Teacher* **49**, 357.
- Knauer T. (2002) A compact disk transmission spectroscope. *The Physics Teacher* **40**, 466.
- Lewowski T. (2006) LCDs allow a simple polariscope to look at mechanical stresses. *Physics Education* **41**, 210.
- Mamola K. C. (1983) Inversions of shadows on the retina. *The Physics Teacher* **21**, 332.
- Marín Sánchez M., Pinto G., Hernández J. M. Martín Sánchez M. T. (2015) El aparato de Colladon y su relación con la fibra óptica. Reseña histórica y aplicaciones didácticas. *Revista Española de Física* **29**, 34.
- Mauser M. (2011) Experiencing light's properties within your own eye. *The Physics Teacher* **49**, 19.
- Nöldeke C. (1990) Compact disc diffraction. *The Physics Teacher* **28**, 484.
- Polak R., Cua A. J., Perez D. J., Robertson M. Q., Stuck J. A., Thomas J. M. (2014) Low-cost student experiments in optics. *The Physics Teacher* **52**, 442.
- Shakhashiri B. Z. (2011) *Chemical demonstrations. A Handbook for teachers of Chemistry*, Vol. 5. Madison, WI: The University of Wisconsin Press.
- Tarásov L., Tarásova A. (1982) *Charlas sobre la refracción de la luz*. Moscú: Mir.
- Touger J. (2010) Which observations should we believe?: An activity using the Pulfrich pendulum. *The Physics Teacher* **48**, 35.
- VanDolomen D. (2012) Binder clip optics bench for Young's double-slit experiment. *The Physics Teacher* **50**, 116.
- Velasquez P., Sánchez-López M. M., Moreno. I., Puerto D., Mateos F. (2005) Interference birefringent filters fabricated with low cost commercial polymers. *American Journal of Physics* **73**, 357.
- VVAA (2002) *El color*. Temas IyC, núm. 27. Barcelona: Prensa Científica.
- VVAA (2015) *Ciencia con luz propia. Aplicaciones tecnológicas de la luz* (Unidad didáctica). Madrid: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Wakabayashi F., Hamada K., Sone K. (1998) CD-ROM spectroscope: A simple and inexpensive tool for classroom demonstrations on chemical spectroscopy. *Journal of Chemical Education* **75**, 1569.
- Wakabayashi F., Hamada K. (2006) A DVD spectroscope: A simple, high-resolution classroom spectroscope. *Journal of Chemical Education* **83**, 56.
- Yuste M., Carreras C. (1988) El arco iris: el fenómeno natural en la enseñanza de la Física. *Revista Española de Física* **2**, 28.

OÍR Y VER

61 experimentos de acústica y óptica

Los animales (entre los cuales se encuentra el ser humano) emplean sensores fisiológicos para obtener información de su entorno. Entre ellos podemos encontrar sensores eléctricos, magnéticos, térmicos, químicos, mecánicos y ópticos, por mencionar algunos. Varios de estos sensores son compartidos, en mayor o menor medida, por diversos animales, aunque están más desarrollados en unos que en otros. Esto ocurre en los seres humanos, pues no son igual de eficientes los cinco sentidos (vista, oído, tacto, olfato y gusto) de que disponemos. El sentido más empleado es el de la vista, seguido del oído, seguramente porque ambos permiten la detección a distancia; mientras que el primero se basa en las señales luminosas, el segundo requiere de estímulos acústicos.

En este libro se presentan experiencias relacionadas con estos dos sentidos, cuyas fuentes de información (luz y sonido, respectivamente) comparten, con los oportunos matices, características de los fenómenos ondulatorios. Los materiales necesarios para cada experiencia son fáciles de conseguir, pues se encuentran en la mayoría de centros de enseñanza y, también, en muchos hogares.

ISBN 978-84-16551-72-9



9

788416

551729