

III - CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

(ALGUNAS NOTAS SOBRE EL TEMA)

III.1 - Inducción electromagnética: Ley de Lenz-Faraday. Flujo magnético.

III.2 - Generadores y motores eléctricos.

III.3 - Las leyes de los campos electromagnéticos: Maxwell

III.4 - El espectro electromagnético. El color.

III.5 – ¿Cómo funciona una lente? reflexión, refracción.

III.6 – Luz + luz oscuridad: Interferencia, difracción, polarización.

III.1 - Inducción electromagnética: Ley de Lenz-Faraday. Flujo magnético.

Si sorprendentes son las reglas de la naturaleza que hemos visto hasta ahora, *Gravitación Universal, ley de Coulomb, ley del movimiento de Newton, interacción campo magnético corriente eléctrica...*, existe otro comportamiento de la Naturaleza ciertamente asombroso. Como siempre nosotros nos limitaremos a describirlo, lo cual es bastante, y a expresarlo matemáticamente, lo cual no deja de ser fantástico, y, para nuestro nivel, algo elevado.

- El experimento

Recordemos que si establecemos una corriente en las proximidades de una brújula (un imán) interactúan de modo que esta se desplaza situándose perpendicularmente a la corriente. Si una corriente produce un campo magnético lo inmediato es pensar que un campo magnético produzca una corriente, esto no sucede salvo que el campo magnético varíe, fue en 1831, once después de las experiencias de Ørsted, cuando Faraday realizó experiencias del tipo mostrado en la imagen¹. Al desplazarse el imán, se induce una corriente eléctrica en la bobina. El fenómeno, como todos los fenómenos básicos que hemos mostrado de la Naturaleza, no hay quién lo entienda no sabemos porqué la Naturaleza es así, lo que si tenemos que entender es la descripción del mismo.

La descripción es bastante más compleja que las que hemos hecho hasta ahora y necesitamos de algunas herramientas matemáticas que desconocemos. Una de ellas es el concepto de “*flujo*” y otra la de “*circulación*”.

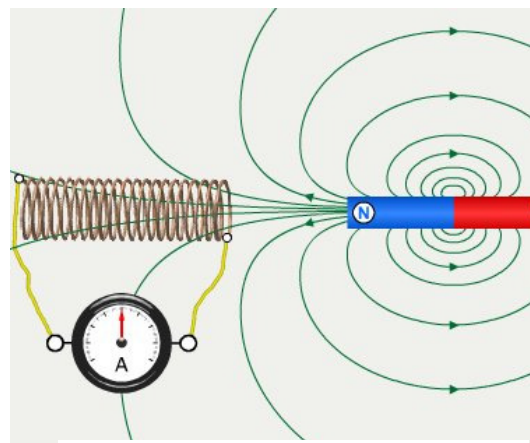


Imagen tomada del SUPERCOMET:
<http://online.supercomet.no/>

Ver video y animaciones en: <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/faraday/inductance/inductance.htm>

Tarea III.1.1.-

¿Qué sucede cuando el imán está en reposo?

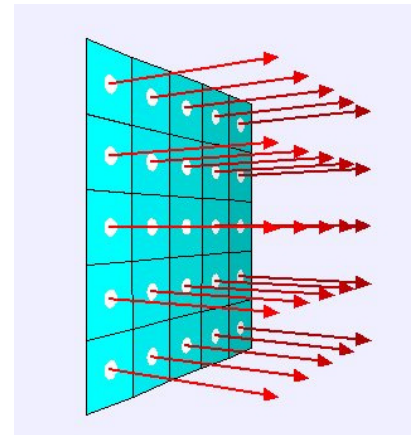
Tarea III.1.2.-

¿Qué sucedería si en lugar de mover el imán movemos la bobina?

¹ Video con la experiencia; <http://www.youtube.com/watch?v=PZNG8mwLNVU>

- Bautizando: un nuevo término FLUJO

Si dibujamos las líneas de un campo de modo que representemos tantas líneas por unidad de superficie perpendicular a esas líneas como su valor, al número de líneas que atraviesen una superficie le vamos a llamar *flujo del campo a través de la superficie*. La imagen de la derecha muestra veinticinco líneas que atraviesan una superficie que suponemos es igual a la unidad, el flujo de ese campo a través de esa superficie será igual a veinticinco.



En la imagen se observa cómo un cierto número de líneas de campo magnético atraviesan las espiras de la bobina, ese número será el

flujo del campo magnético a través de la espira.

- Expresándolo con símbolos (matemáticos)

Matemáticamente este número se calcula mediante una expresión que, para nuestro nivel, nos puede resultar impactante:

El flujo del campo magnético a través de la superficie de las espiras de la bobina es igual a:

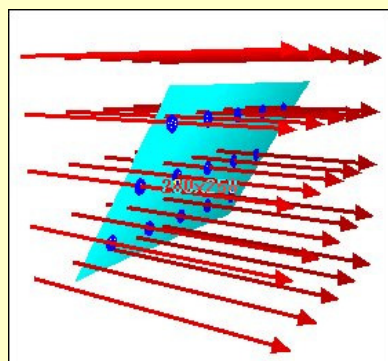
$$\iint_{S \text{ espiras}} \vec{B} * d\vec{S}$$

Este código, con esta simbología, nos es extraño pero lo que esconde no lo es, esas “eses” alargadas indican sumas, y lo que hay que sumar es el producto escalar del campo magnético por la superficie en la que quiero calcular su *flujo*. Esta tarea se la dejamos a los matemáticos, a nosotros nos basta con la idea de nuestro *código secreto (matemáticas)*

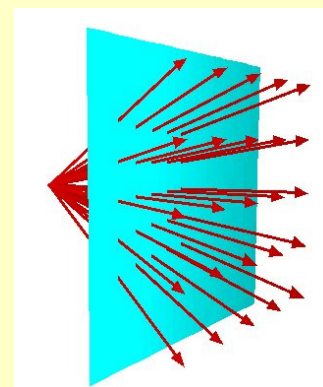
Tarea III.1.3.-

¿Cuál es flujo del campo mostrado en la imagen a través de la superficie (a)?

¿ y a través de la superficie (b)?



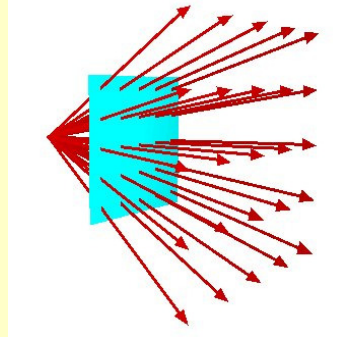
(a)



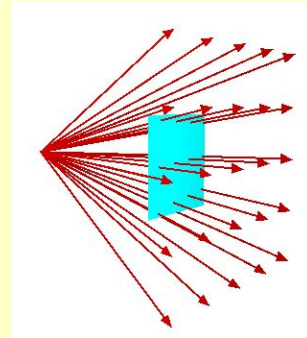
(b)

Tarea III.1.4.-

Supuesto que las superficies de las dos imágenes son iguales ¿qué podemos decir del valor del campo en la zona en la que se encuentra la superficie en la imagen (a) respecto a la zona en la que se encuentra en la imagen (b)?



(a)



(b)

Ver simulación en: <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/vectorfields/surfaceintegrals/surfaceintegrals.htm>

- Reflexionando sobre lo que sucede en la bobina

La bobina se encuentra conectada a un dispositivo en cuyo interior se encuentra algo básicamente muy parecido al motor eléctrico que vimos en el capítulo anterior, una bobina en un campo magnético, cuando circule corriente eléctrica por la bobina la espira se moverá, este movimiento lo podremos detectar gracias a una aguja que lleva acoplada. Lo que nos preguntamos es:

Tarea III.1.5.-

Para que las cargas que se encuentran en la bobina se desplacen (se genere una corriente eléctrica) ¿qué tiene que suceder?

Como vimos en el capítulo anterior, las cargas eléctricas son sensibles a los campos eléctricos, si se produce un desplazamiento ordenado de las cargas libres del conductor que forma la bobina tiene que ser porque un campo eléctrico está actuando sobre ellas. Establecemos que:

Si se produce una variación de flujo del campo magnético en una región se genera un campo eléctrico, este campo eléctrico puede producir una corriente si se encuentra un conductor cerrado en dicho espacio.

Tarea III.1.6.-

¿Cómo se puede generar una corriente eléctrica?

La expresión en símbolos matemáticos requiere de otro “bautizo” cuyas bases se encuentran en uno de los capítulos denominados como: *Conocimientos previos: 03 - ENERGÍA*, en el apartado *03.1 – Fuerza por distancia* nos encontramos con la expresión:

$$W = \sum \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = \int \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Podemos interpretarla como el *recorrido del vector $\vec{F}$ a lo largo de una línea*. A esta expresión se llama: *Circulación del vector a lo largo de una línea*. Si ese vector es una fuerza, la integral nos da el trabajo que realiza esa fuerza a lo largo de una línea, en el caso que nos ocupa, ley de Faraday de la inducción electromagnética, la generación de la corriente es debida al trabajo que realiza el campo eléctrico producido por la variación del flujo de campo magnético. En nuestro lenguaje supercomprimido (matemáticas):

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Ciertamente una expresión imponente para nuestro conocimiento de este lenguaje, podemos considerarlo como el tope de uno de los objetivos de este curso, describir un fenómeno de la Naturaleza, este fenómeno es muy básico y no se entiende (yo no lo entiendo) pero lo que si debemos entender es cómo lo describimos. Aunque parece algo muy complicado (puede serlo su manejo pero ese aspecto no lo exigimos) el segundo miembro es la forma de decir;

Variación con el tiempo del número de líneas de campo magnético que atraviesan una superficie abierta con signo negativo.

El primer miembro nos describe el hecho fundamental, *esa variación nos genera un campo eléctrico cuya circulación a lo largo de la línea que limita la superficie es igual a esa variación*

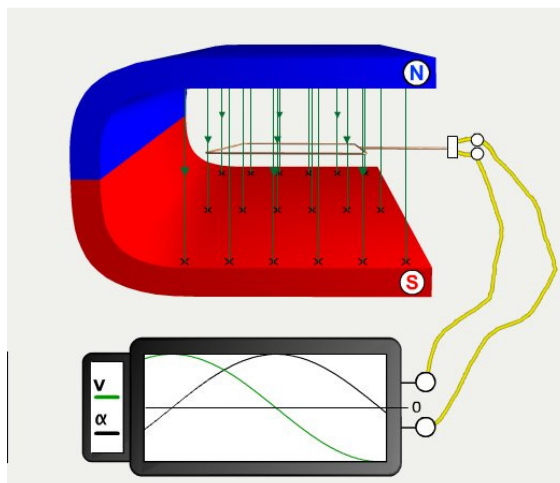
La descripción del fenómeno de la inducción, muy importante para tener un conocimiento más próximo de las ondas electromagnéticas, nos ha llevado a la expresión más compleja con la que nos encontraremos en este curso.

III.2 - Generadores y motores eléctricos.

Recordemos el motor eléctrico, en ese caso hacíamos pasar una corriente que se encuentra en un campo magnético, dispuesta en una bobina rectangular y situada de forma que la acción del campo sobre la corriente hace girar dicha bobina.

En la imagen observamos un dispositivo similar al motor eléctrico: un campo magnético y una espira, en este caso no hacemos pasar una corriente por la espira para que esta gire sino que la hacemos girar y obtenemos una corriente eléctrica.

MOTOR	GENERADOR
Campo magnético Espira con corriente	Campo magnético Espira que gira
	
Gira la Espira	Se genera corriente en la Espira



Ver <http://online.supercomet.no/> Módulo: Inducción Electromagnética. Pantalla 17

III.3 - Las leyes de los campos electromagnéticos: Maxwell

El comportamiento de las cargas eléctricas en movimiento y los imanes constituye uno de los fenómenos básicos de la Naturaleza que describimos primero en lenguaje “científico-coloquial” y seguidamente mediante un lenguaje extraordinariamente comprimido, las matemáticas.

$$\int_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint_{S \text{ espiras}} \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Esta primera expresión es la representación matemática de la ley de inducción de Faraday que hemos tratado anteriormente, fenómeno de la Naturaleza descubierto mediante experiencias. La siguiente expresión no proviene de experiencias de laboratorio, proviene de la utilización de las reglas que rigen las matemáticas.

$$\int_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = - \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

El aspecto de esta expresión es completamente similar a la anterior pero intercambiando el campo eléctrico con el magnético. Tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas, Maxwell fue capaz de despejar y así obtuvo una expresión similar a la de las ondas en cuerdas pero con los campos.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

Si comparamos esta ecuación con la ecuación 3.1 del apartado II.3 - Ecuación de ondas ... y la Luz se hizo, vemos total similitud formal, luego puede haber ondas electromagnéticas ya que podemos obtener otra expresión similar para el campo magnético. Lo fundamental de estas expresiones es que si derivamos dos veces con respecto al tiempo la expresión que nos da la magnitud bajo estudio, y la derivamos dos veces con respecto al espacio, obtenemos lo mismo salvo un factor relacionado con la velocidad de propagación. En nuestro caso cuando Maxwell calculó el valor de $1/(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$ obtuvo una cifra muy próxima a la velocidad de la luz. Era el *nacimiento de la luz como onda electromagnética*. Por lo tanto el paritorio no fue un laboratorio sino un despacho.

III.4 - El espectro electromagnético. El color.

Hay una gran variedad de fenómenos en la naturaleza que son ondas electromagnéticas, esto no nos debe sorprender dado que toda la materia que conocemos está formada por cargas eléctrica que son las generadoras de las ondas electromagnéticas.

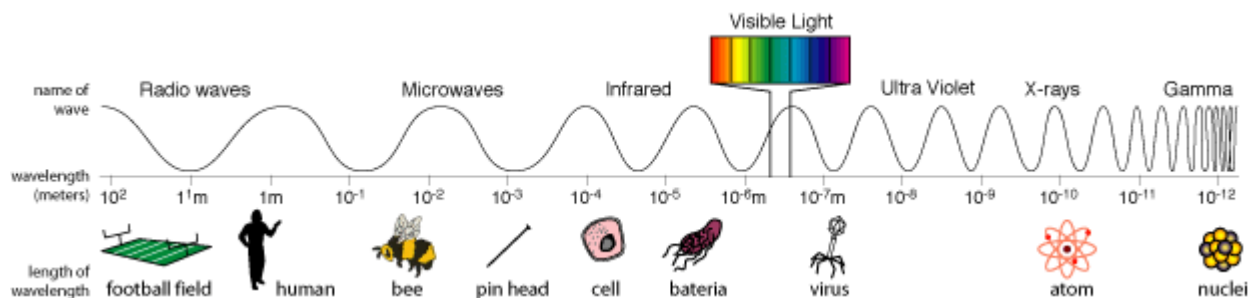


Imagen tomada de: <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/waves3.html>

En la imagen se muestra el espectro electromagnético con los principales nombres que toman las ondas electromagnéticas principalmente según su procedencia relacionada su longitud de onda con objetos que nos pueden resultar familiares. La representación no está realizada a escala.

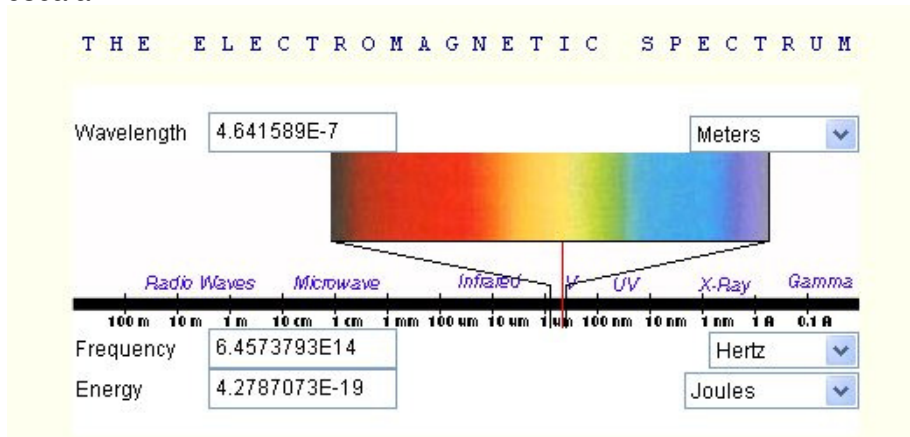


Imagen capturada de la simulación:

http://webs.um.es/jmz/jmz/AmpElectroMag_CD/applet_espectro/indice.html

Applet creado por GuyMcArthur. Original en <http://guymcarthur.com/resources/java/applets/st/>

De esta amplia variedad de ondas nuestros ojos solamente detectan las que van de 400 a 700 nm aproximadamente, 750 000 GHz a 430 000 GHz, si nos llegase una onda electromagnética de una frecuencia dada nuestro ojo la detectaría y la señal, transmitida a nuestro cerebro la representa mediante lo que conocemos como colores, en general, dentro del rango del visible, nos llegan ondas de diversas frecuencias por lo que el proceso del color es complejo, sabemos que con tres colores podemos obtener toda la gama cromática, este es el proceso que ha utilizado la impresora que produjo esta página.

Ver "Colores primarios": <http://www.educaplanet.org/luz/colprima.html>

La galaxia M51 vista en diferentes longitudes de onda: http://www.caosyciencia.com/visual/fla.php?id_fla=192

III.5 – ¿Cómo funciona una lente? reflexión, refracción.

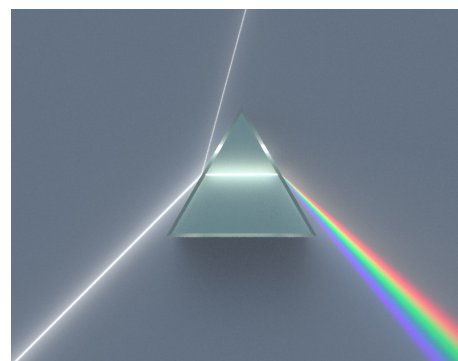
Hasta ahora hemos hablado de ondas en una dimensión cuyo prototipo son las ondas que se propagan en una cuerda y cuyo ejemplo más notable son los instrumentos musicales de cuerda, en general las ondas se propagan en dos o tres dimensiones, en ejemplo muy típico de las primeras son las ondas en la superficie del agua y de las segundas las ondas sonoras y electromagnéticas, luz, radares, rayos X, TV, radio



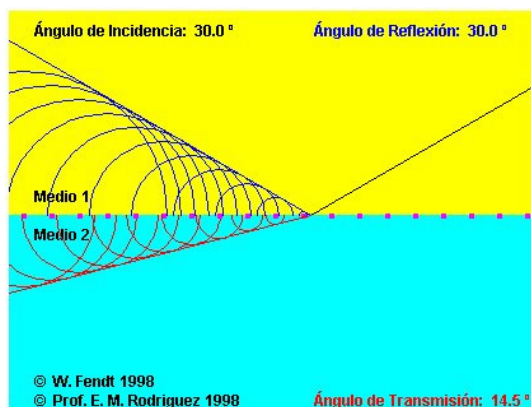
A los puntos que tienen la misma amplitud se les denomina *frente de ondas*.

Una característica de todas las ondas es que su velocidad de propagación depende del medio en el que se propaga, ello da lugar a los fenómenos de reflexión y de refracción, este fenómeno es fácil de visualizar mediante el proceso geométrico propuesto por Huygens, astrónomo, físico y matemático holandés, nacido en La Haya en 1629, por el que cada punto al que llega una onda se convierte en emisor.

El modo de caracterizar la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio es mediante el llamado índice de refracción que se define como el cociente entre la velocidad de propagación en el vacío y la velocidad de propagación en el medio.



$$n = \frac{c}{v} = \frac{\text{velocidad en el vacío}}{\text{velocidad en el medio}}$$

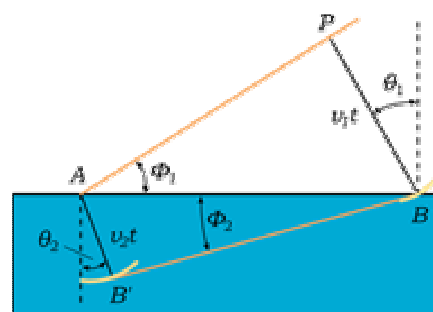


En la imagen tomada de una simulación de Walter Fendt, se muestra un frente plano que está incidiendo sobre una superficie plana que separa dos medios diferentes. Al llegar la onda a la superficie de separación de los dos medios cada elemento de esta superficie de separación se comporta como un emisor de ondas, la simulación nos permite llegar a la propagación de las ondas y su representación en frentes de onda o rayos, y visualizar los ángulos que forman los diferentes elementos involucrados.

Imagen tomada de la simulación: http://colos.inf.um.es/Cursos/Walter/phs/huygenspr_s.htm

Esta situación la podemos esquematizar en la siguiente imagen.

En la imagen se dibuja el frente de ondas en el momento en que alcanza el segundo medio en el punto A , al cabo de un tiempo t el punto P ha recorrido $v_1 t$ mientras que en el segundo medio en el mismo tiempo el frente ha recorrido $v_2 t$. Por relaciones trigonométricas podemos deducir de la imagen de la derecha.



$$AB = \frac{v_1 t}{\sin \theta_1} = \frac{v_2 t}{\sin \theta_2} \quad \longrightarrow \quad \frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

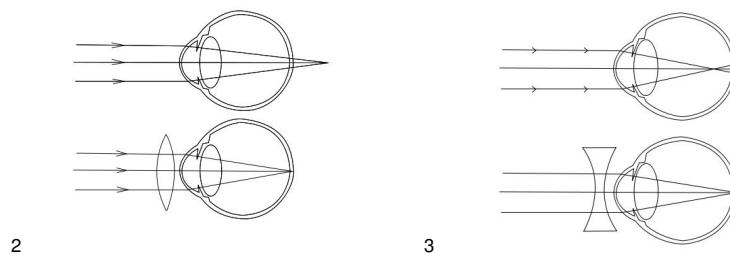
Tarea III.6.1:

¿Cómo interpretamos la imagen esquemática?

Si multiplicamos ambos miembros por la velocidad de la luz c y a la relación entre esta velocidad y la velocidad de propagación de la onda en el medio la llamamos índice de refracción del medio, n , obtenemos la *ley de Snell* para la refracción.

$$\frac{c}{v_1} \sin \theta_1 = \frac{c}{v_2} \sin \theta_2 \quad \longrightarrow \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

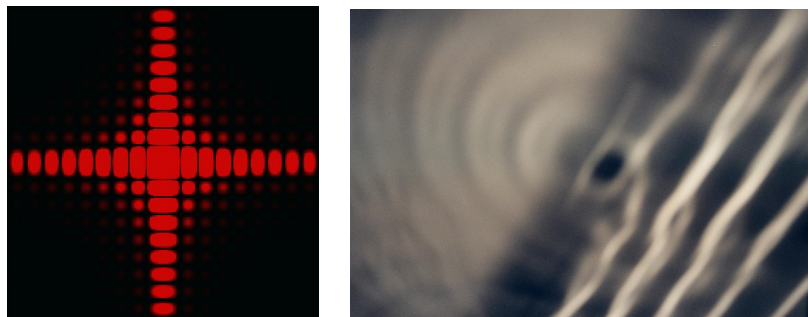
Al variar la velocidad con la que se propaga una onda la dirección del frente de ondas varía. Este hecho lo podemos utilizar para modificar la trayectoria de la luz en la forma que deseemos.



Las lentes nos permiten modificar las trayectorias de los rayos para que las imágenes se formen del mejor modo posible en la retina del ojo.

III.6 - Luz + luz oscuridad: Interferencia, difracción. Polarización.

La interferencia ocurre cuando dos ondas se combinan al encontrarse en el mismo punto del espacio, sus efectos se superponen. Existe una infinidad de fenómenos en lo que esto sucede. La difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio.

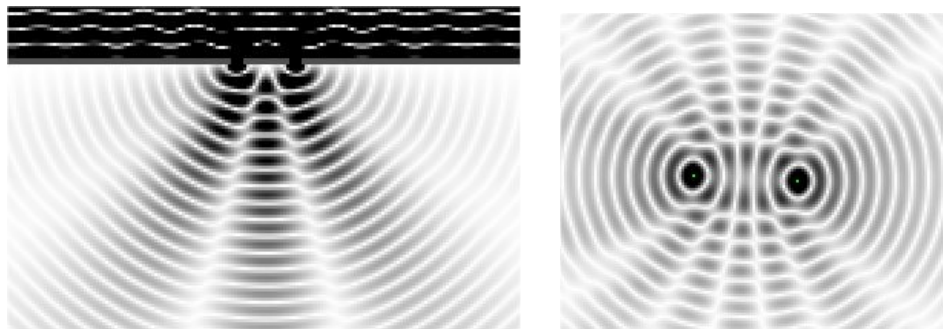


Imágenes tomadas de <http://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction>

El caso conceptualmente más sencillo de difracción es la difracción por un rendija estrecha que se produce al llegar una onda a una rendija estrecha, esto es, significativamente menor que la longitud de onda de la onda.

En el portal de *caosyciencia* podemos encontrar un vídeo con experiencias de interferencia por dos rendijas que pone de manifiesto las diferencias y similitudes que presentan los corpúsculos y las ondas y el doble comportamiento que pueden presentar las partículas: http://www.caosyciencia.com/visual/video.php?id_vid=52

En la web del MIT, Massachusetts Institute of Technology, se encuentra una simulación con la que se pueden diseñar y realizar muchas experiencias sobre interferencias y difracción.



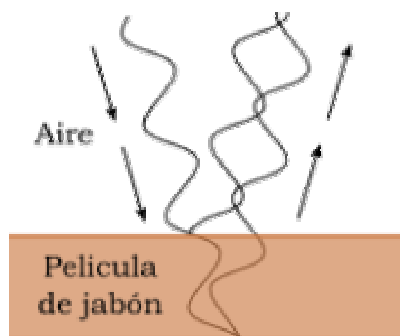
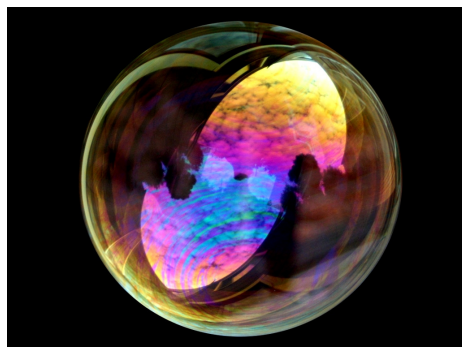
<http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/simulations/waves/waves2d.htm>

² <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Hypermetropia.svg>

³ <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Myopia.svg>

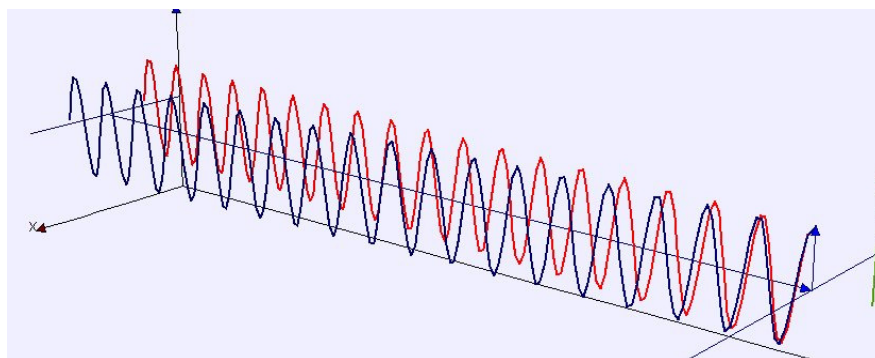
En la imagen de la izquierda se muestra la interferencia de dos ondas generadas por dos fuentes puntuales, a la derecha difracción por dos rendijas.

Un bonito fenómeno de superposición, en el que interviene luz blanca, son los colores que se aprecian en láminas muy finas como las pompas de jabón o los charcos de aceite. El hecho se produce debido a la superposición de las ondas que se reflejan en la primera superficie y en la segunda de la lámina.



http://www.exploratorium.edu/ronh/bubbles/bubble_colors.html

Todos estos fenómenos tienen su base en las distintas situaciones en que se superponen las señales debido a los diferentes caminos que recorren.

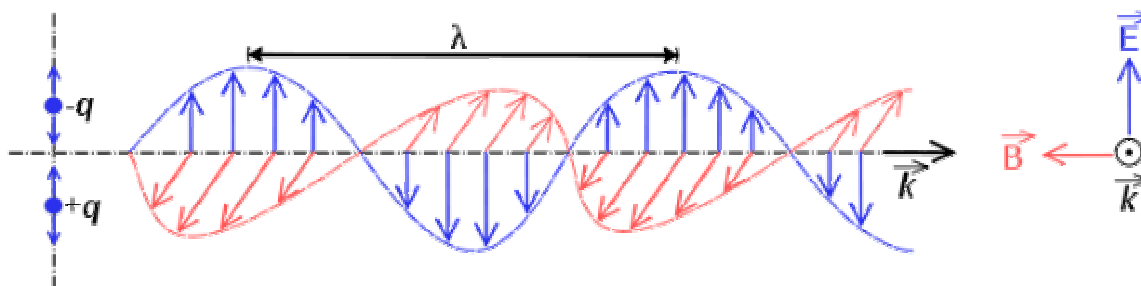


http://webs.um.es/jmz/www_ondas/interferencia/interferencia.html

En la imagen vemos dos señales que recorren en este caso el mismo camino por lo que las señales se suman constructivamente pero si desplazamos el punto de observación en la pantalla cuando lleguen de forma que cuando una tenga un máximo la otra sea un mínimo la señal se anulará: **LUZ + LUZ OSCURIDAD**

Polarización.

Una característica esencial de las ondas electromagnéticas es que son ondas transversales y por ello pueden estar polarizadas.

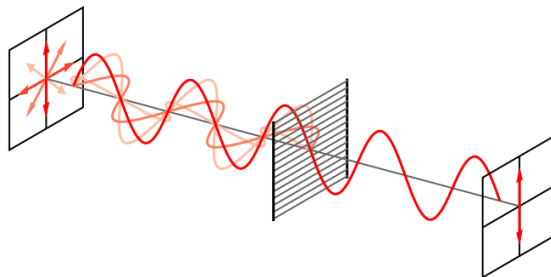


Ver simulación en: <http://surendranath.tripod.com/Applets/Waves/Polarisation/PolWaveApplet.html>

⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.svg

En una onda electromagnética el campo eléctrico tiene una dirección perpendicular a la dirección de propagación, puede además encontrarse siempre en un plano, en este caso decimos que la onda electromagnética se encuentra polarizada linealmente. En general el campo eléctrico variará su dirección.

⁵Podemos obtener luz polarizada linealmente a partir de luz no polarizada utilizando ciertos materiales que permiten el paso de la componente del campo eléctrico en una única dirección. No importa cómo sea la orientación del polarizador, la intensidad de la luz transmitida polarizada es la mitad de la luz no polarizada. La razón es que la luz no polarizada contiene todas las direcciones de polarización por igual, el campo eléctrico en cualquier dirección podemos descomponerlo en una componente perpendicular y otra en la misma dirección que el eje de polarización, en valor medio estas componentes son iguales, no hay una dirección privilegiada dado que la onda no está polarizada, por lo tanto el material polarizado deja pasar tanta intensidad de campo eléctrico como la que impide pasar.



En *Física 2000* encontramos una descripción cualitativa de fenómenos relacionados con este tema:

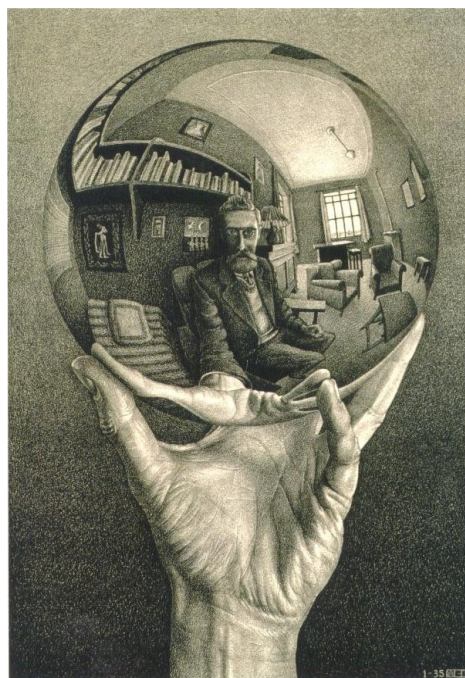
<http://www.maloka.org/fisica2000/polarization/polarizationI.html>

Lectura: Espejos curvos.

M.C. Escher's drawing of his hand holding a reflecting sphere. The sphere reflects everything in the room on its surface. Can you determine which hand Escher was holding the sphere in. Read Escher's quote to find out.

Hint: This picture is a lithograph and so the prints are reversed from the artist's original drawing.

"The picture shows a spherical mirror, resting on a left hand. But as a print is the reverse of the original drawing on stone, it was my right hand that you see depicted. (Being left-handed, I needed my left hand to make the drawing.) Such a globe reflection collects almost one's whole surroundings in one disk-shaped image the whole room, four walls, the floor, and the ceiling, everything, albeit distorted, is compressed into that one small circle. Your own head, or more exactly the point between your eyes, is the absolute center. No matter how you turn or twist yourself, you can't get out of that central point. You are immovably the focus, the unshakable core, of your world." - M. C. Escher



*Hand with Reflection Sphere
(Self-Portrait in Spherical Mirror)*

Is Escher's statement about the point between the eyes always being at the center of the sphere accurate? Considering the eye as a lens, how does this statement relate to the object and image in mirrors and lenses?

Este apartado está tomado de: http://ww2.slcc.edu/schools/hum_sci/physics/tutor/2220/optical_instruments/

⁵ <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wire-grid-polarizer.svg>

BIBLIOGRAFÍA:

FÍSICA PARA UNIVERSITARIOS. Douglas C. Giancoli. Editorial Prentics Hall.
Volumen II capítulo 29 Inducción Electromagnética.

Physics. Cutnell & Johnson. Ed. Wiley. 7ª edición Capítulo 22 Electromagnetic Induction.

FÍSICA UNIVERSITARIA. Young and Freedman. Ed. Pearson International. 12 edición
Capítulo 29 Inducción Electromagnética.

ENLACES

Conceptual Physics: 6.3 Induction, by Benjamin Crowell

http://www.lightandmatter.com/html_books/7cp/ch06/ch06.html#Section6.3

<http://online.supercomet.no/>.

Inducción Electromagnética. Pantalla 5: Inducción Mediante Un Imán En Movimiento

IMAGERS (Interactive Multimedia Adventures for Grade School Education Using Remote Sensing) <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/index.html>