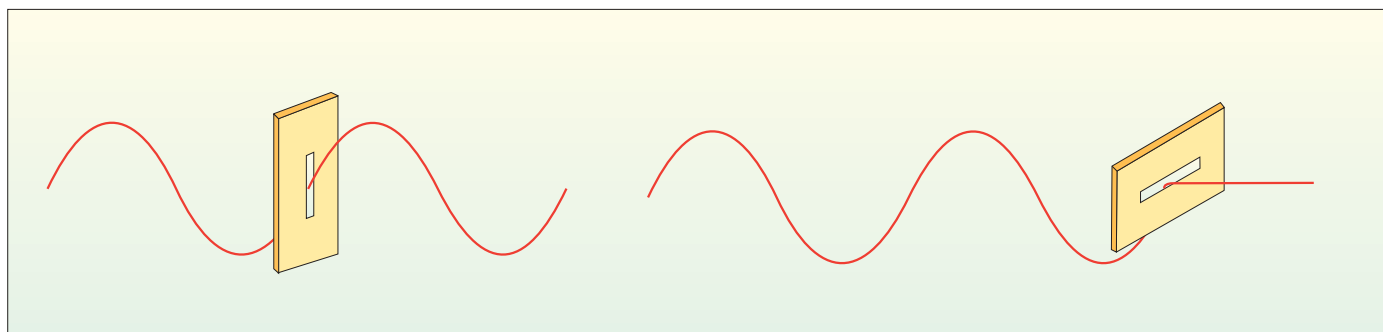


En caso de que la vibración de la cuerda se haga en una sola dirección, por ejemplo en la vertical, si la rendija se coloca en dirección vertical la onda no sufrirá ningún cambio al atravesar la rendija mientras que si la rendija se coloca horizontalmente la onda desaparecerá al atravesar la rendija.



Existen otros tipos de polarización además de la lineal, como la circular o elíptica, que presentan más problemas para su comprensión.

La polarización servirá para diferenciar las ondas transversales de las longitudinales. Este fenómeno no sólo se produce en las ondas transversales mecánicas sino también en las electromagnéticas, como la luz. Las ondas sonoras no pueden ser polarizadas ya que son longitudinales.

7 LA REFLEXIÓN Y LA REFRACCIÓN

Estos fenómenos ocurren cuando una onda llega a una superficie que separa dos medios con propiedades diferentes para la propagación de esa onda.

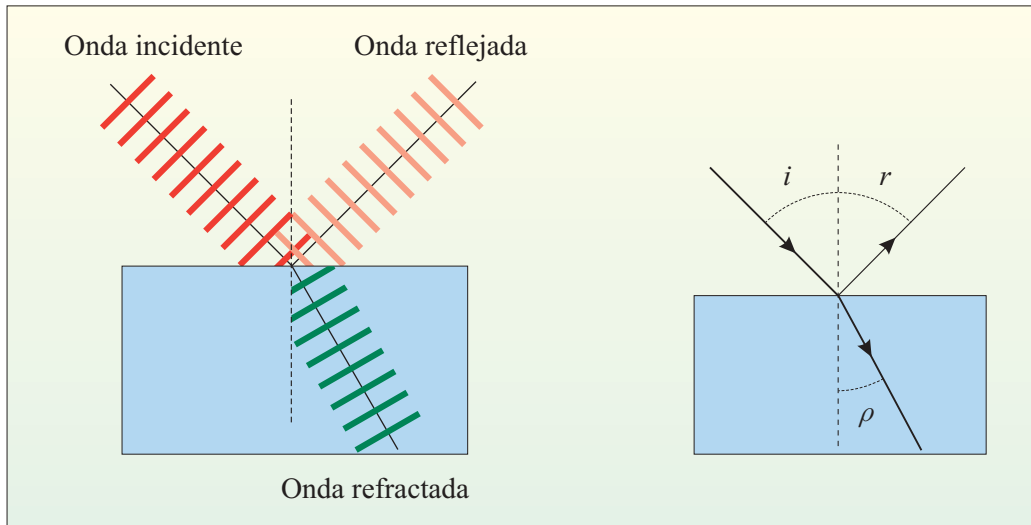
En la **reflexión** la onda choca con un obstáculo y prosigue su avance en el mismo medio, cambiando su dirección: se cumple en este fenómeno que el ángulo de incidencia i es igual al ángulo de reflexión r .

Los fenómenos de reflexión son los causantes de numerosos efectos: los sonidos que se perciben incluyen el emitido directamente por la fuente sonora junto al que se refleja en las paredes y objetos próximos; los locales en los que el sonido juega un papel importante, teatros, auditorios, etc., han de ser construidos teniendo en cuenta las reflexiones y procurando evitar efectos desagradables, como los ecos y reverberaciones. Como aplicaciones tecnológicas de la reflexión del sonido o de los ultrasonidos podemos mencionar el sonar o las ecografías. En éstas se utilizan sonidos cuyas frecuencias son muy elevadas (ultrasonidos), entre 1 y 10 MHz, cuyas longitudes de onda son muy pequeñas, menores de 0,3 mm, lo que permite la observación de cuerpos de

REFLEXIÓN DEL SONIDO

En el eco percibimos sonidos directos y los reflejados por obstáculos, y podemos distinguir unos de otros. En la reverberación no se distinguen y el efecto es que se oye mal.

pequeño tamaño. También en la luz es muy importante la reflexión, no sólo por la formación de imágenes en espejos, sino por algo tan importante como es que podamos ver todos los cuerpos, ya que como sabemos la reflexión difusa es la que nos permite la visión de casi todo lo que podemos ver.



En la **refracción**, la onda pasa a propagarse por el segundo medio, pero sufre una desviación en su dirección. En este fenómeno se cumple la llamada ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } \rho} = \frac{v_1}{v_2}$$

i representa al ángulo de incidencia, ρ al ángulo de refracción y v_1 y v_2 las velocidades de propagación de la onda en los dos medios. El cambio de velocidad es lo que origina el cambio de dirección. Se comprueba experimentalmente que la frecuencia de la onda transmitida al segundo medio es la misma que la de la onda incidente; se explica porque la frecuencia de la onda depende de la frecuencia con la que vibra el foco y no depende del medio. En cambio las longitudes de onda de las ondas incidentes y refractadas son distintas, puesto que la velocidad de propagación es diferente en cada medio.

En la propagación de ondas luminosas se utilizan los **índices de refracción** (n) de ambos medios en lugar de la velocidad de propagación de la luz en cada uno. El índice de refracción se define como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en ese medio (v):

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

La ley de Snell se puede escribir utilizando los índices de refracción:

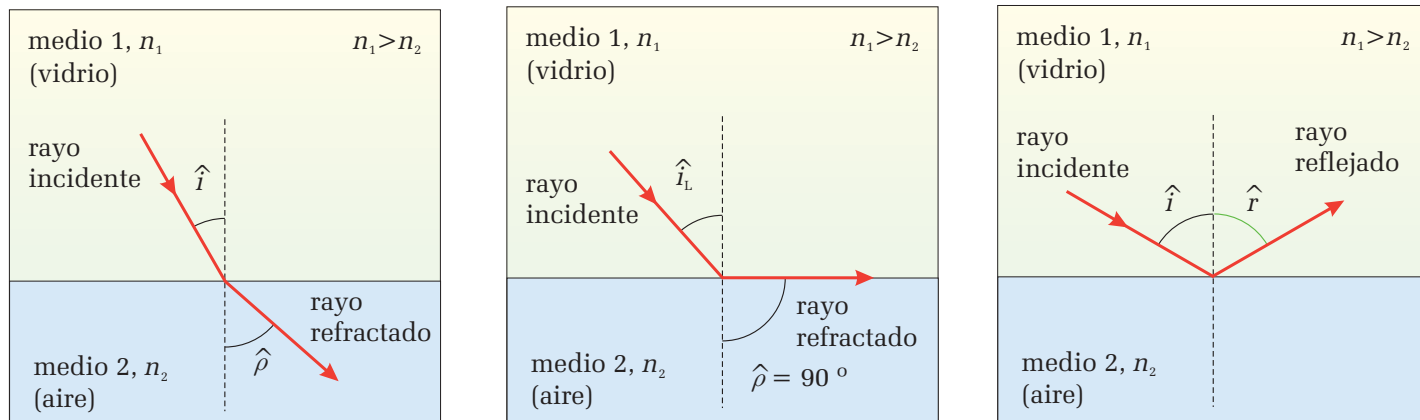
$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } \rho} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } \rho$$

Ángulo límite o ángulo de reflexión total

Cuando una onda pasa de un medio de menor índice a otro de mayor índice de refracción el rayo refractado se acerca a la normal, $i > \rho$. Ejemplo: cuando la luz pasa del aire al vidrio. Si el paso es de un medio de mayor índice a otro de índice menor el rayo refractado se aleja de la normal, $\rho > i$. Esto ocurre cuando la luz pasa del vidrio al aire.

En este caso, hay un valor límite para el ángulo de incidencia, por encima del cual el rayo no sale de ese medio pues ρ pasaría de 90° .

En el dibujo adjunto se puede observar lo que ocurre cuando una onda pasa de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor índice:

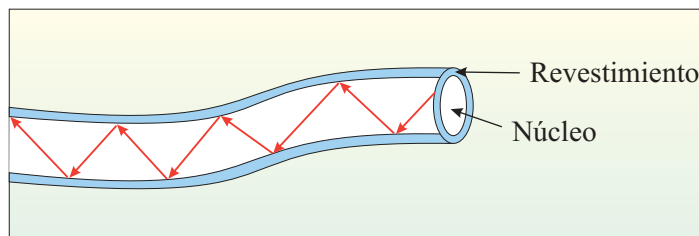


El rayo 1 pasa al otro medio alejándose de la normal. El rayo 2, cuyo ángulo de incidencia es igual al ángulo límite, tiene un ángulo de refracción de \$90^\circ\$. El rayo 3, cuyo ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite se refleja totalmente y no se refracta.

El valor del ángulo límite se puede calcular aplicando la ley de Snell:

$$n_1 \text{ sen } i_L = n_2 \text{ sen } 90 \quad i_L = \text{arc sen } \frac{n_2}{n_1}$$

Cuando la onda cambia de medio material: parte de la onda se refleja y parte se refracta. Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite no hay rayo refractado, por lo que se dice que hay reflexión total. La reflexión total se utiliza en las fibras ópticas que son medios transparentes en los que se transmite la luz de forma que incide sobre la superficie con ángulos mayores al ángulo límite, permitiendo así que la luz no se disperse y «viaje dentro de la fibra».



Si una onda que se propaga linealmente sufre una reflexión total las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas serán iguales. Cuando hay refracción, las amplitudes de las ondas incidentes, reflejadas y refractadas serán distintas en general y habrá una relación entre ellas que variará según los casos y que vendrá dada por el principio de conservación de la energía (recuerda que la energía transmitida por una onda depende del cuadrado de la amplitud). En el caso de que se produzca refracción y/o reflexión las amplitudes de las ondas serán tales que la energía transportada por la onda incidente sea igual a la suma de la transportada por la refractada y por la reflejada.

En la siguiente unidad se estudiarán diferentes situaciones en las que se presenta el fenómeno de la refracción.

EJEMPLO

- Sabiendo que el índice de refracción del metacrilato es 1,6, ¿cuál es la velocidad de la luz en el metacrilato?
- Un rayo luminoso pasa del agua (índice de refracción de 1,33) al metacrilato, siendo el ángulo de incidencia de \$30^\circ\$. ¿Cuál será el ángulo de refracción? ¿Cuál será el ángulo límite para los rayos luminosos que se dirijan desde el agua hacia el metacrilato?
- ¿Cuál será el ángulo límite para los rayos luminosos que se dirijan desde el metacrilato hacia el agua?

a) El índice de refracción es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio que se esté considerando.

$$n = \frac{c}{v} ; \quad 1,6 = \frac{300000}{v} ; \quad v = 187500 \text{ km/s}$$

b) Teniendo en cuenta la ley de Snell:

$$n_1 \sen i = n_2 \sen \rho; \quad 1,33 \sen 30^\circ = 1,6 \sen \rho; \quad \rho = 24,6^\circ$$

Para el paso de los rayos luminosos desde el agua hacia el metacrilato no hay ángulo límite, pues el rayo refractado se acerca hacia la normal en lugar de alejarse. Incluso para un ángulo de incidencia de 90° le correspondería un ángulo de refracción de $56,2^\circ$.

c) En este caso sí existe un ángulo límite que, como sabemos, es aquel para el cual los rayos se reflejan totalmente y no pasan al otro medio. Para eso, debe cumplirse que el ángulo de refracción sea como mínimo de 90° . Así:

$$n_1 \sen i = n_2 \sen 90^\circ; \quad 1,66 \sen i_L = 1,33 \sen 90^\circ; \quad i_L = \arcsen \frac{1,33}{1,6} = 56,2^\circ$$

A.29.- Haciendo uso de los valores para la velocidad de la luz recogidos en el apartado 1.3, calcula los índices de refracción del aire, agua, vidrio crown y diamante.

$$n_{\text{aire}} = 1; \quad n_{\text{agua}} = 1,33; \quad n_{\text{vidrio}} = 1,5; \quad n_{\text{diamante}} = 2,42$$

A.30.- La velocidad de la luz en el agua es $0,75c$ (siendo c la velocidad de la luz en el aire). a) Si un rayo de luz pasa del aire al agua formando un ángulo de 30° con la normal ¿cuál será el ángulo que forma con la normal el rayo que se propaga en el agua? b) Si el rayo pasa del agua al aire, siendo el ángulo que forma el rayo con la normal en el agua de 30° , ¿cuál será el ángulo que forme con la normal el rayo que se propaga en el aire? c) Calcula el ángulo límite en el paso de la luz del agua al aire.

$$\text{a) } \rho = 22^\circ; \quad \text{b) } \rho = 41,8^\circ; \quad \text{c) } i_L = 48,6^\circ$$

A.31. La luz blanca está formada por luz de diferentes colores. La velocidad de propagación de la luz en el vidrio depende de la frecuencia de la misma, es decir, del color de esa luz. Justifica a partir de ese dato que se produzca la separación de la luz blanca al pasar por un prisma de vidrio.

A.32.- Observación en el vídeo de fenómenos de reflexión y refracción.

8 EL EFECTO DOPPLER

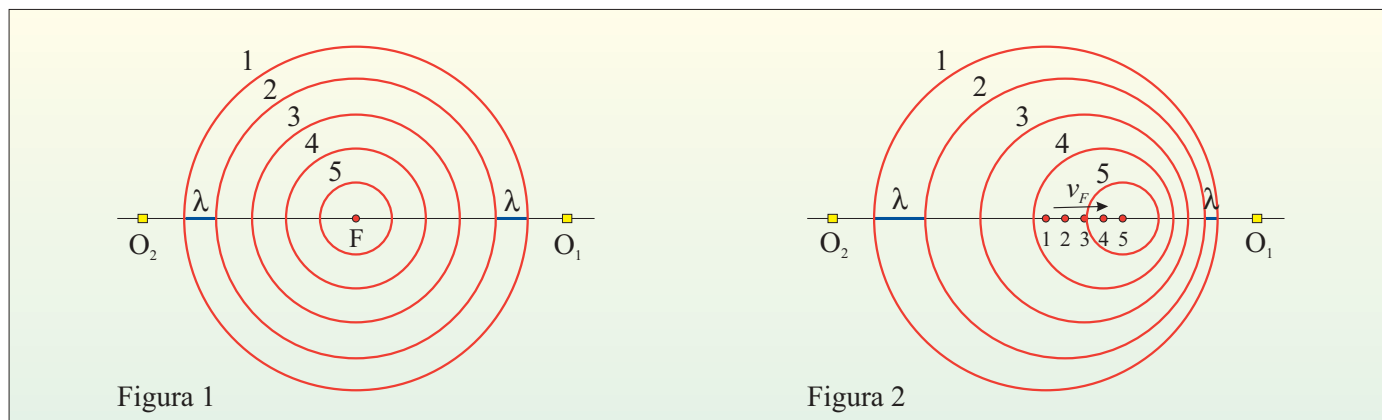
¿Has observado que la sirena de una ambulancia o de un coche de la policía se oye de forma diferente cuando el coche se acerca que cuando se aleja?

Hasta ahora hemos supuesto que el foco era un punto fijo. Es posible, sin embargo, que esté en movimiento, o también, que el punto al que llega una onda esté en movimiento, o que ambos se muevan a la vez.

A.33.- Observación del efecto Doppler en el vídeo.

Cuando la fuente de ondas (el foco), o bien el observador (receptor de las ondas), están en movimiento relativo con respecto al medio material en el cual la onda se propaga, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente. Este hecho se conoce con el nombre de **efecto Doppler**, físico que lo observó en el año 1842. El estudio cuantitativo es complicado por lo que nos limitaremos a hacer un estudio cualitativo.

En los dibujos siguientes puede observarse cómo la longitud de onda es la misma cuando los observadores O_1 y O_2 están en reposo relativo respecto al foco (figura 1), mientras que la longitud de la onda percibida por el observador O_1 es menor que la percibida por el observador O_2 cuando el foco se mueve, acercándose hacia el observador O_1 y alejándose del observador O_2 (figura 2).



En ambas figuras se han representado 5 frentes de onda emitidos a intervalos regulares de tiempo iguales a 1 período. En la figura 2 los puntos numerados señalan la posición del foco cuando emitió el frente de onda marcada con el mismo número. La diferencia entre las longitudes de ondas emitidas y percibidas será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad relativa de la fuente respecto al observador. Es posible establecer una relación cuantitativa entre las frecuencias de las ondas emitidas y observadas, en función de las velocidades de la fuente y el observador y la velocidad de propagación de la onda.

Dado que el observador puede acercarse o alejarse del foco y que, a su vez, el foco puede acercarse o alejarse del observador, los efectos que puede producir una misma velocidad del foco o del observador pueden ser diferentes según se aproximen o se alejen. Cuando se aproximan, la longitud de las ondas percibidas por el observador será menor que si estuvieran en reposo y cuando se alejan será mayor. Si se trata de ondas sonoras el sonido percibido por el observador será más agudo (de mayor frecuencia) cuando se aproximan y más grave (de menor frecuencia) cuando se alejan.

Aplicaciones del efecto Doppler

* Medir la velocidad con la que se alejan las estrellas. Se observa que la luz que llega de las estrellas es de una frecuencia menor a la que teóricamente debería ser (suponiendo que los procesos que ocurren son similares a los que ocurren en el Sol).

* Medida de velocidades de vehículos (radar de la policía de tráfico).

* Medida de la velocidad de líquidos en tuberías, o incluso de la sangre en las venas.

A.34.- Las sirenas de dos barcos A y B suenan simultáneamente con la misma frecuencia de 250 Hz. Se supone que el barco A está parado y el B se mueve a lo largo de la línea que los une. El capitán del barco A percibe un sonido de 240 Hz procedente del barco B. a) Determina si B se aproxima o aleja de A. b) Al cabo de unos minutos vuelve a sonar la sirena del barco B, pero esta vez en el barco A, que permanece en reposo, se percibe un sonido de 230 Hz, ¿qué consecuencia sacará el capitán del barco A respecto de la velocidad de B?

A.35.- ¿Cómo será la frecuencia de la luz emitida por una estrella tal como es recibida por un observador respecto a la frecuencia de la luz realmente emitida, si suponemos que la estrella se está alejando del observador? Si la luz roja es la luz visible de menor frecuencia y la luz violeta es la luz visible de mayor frecuencia, ¿la luz que recibimos de las estrellas estará desplazada hacia el rojo o hacia el violeta? ¿Se te ocurre un procedimiento para medir la velocidad con la que se está alejando una estrella?

9

LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío, mientras que las ondas mecánicas necesitan de un medio material para su propagación. En este apartado nos introduciremos en el estudio de las ondas electromagnéticas (en adelante OEM) y sus principales aplicaciones.

9.1 Fenómenos de radiación

El modelo matemático de onda ha resultado útil para describir numerosos procesos en los que se transmite energía sin transmisión neta de materia. Si con las ondas mecánicas se analizan fenómenos como los terremotos, el sonido, etc.; otros pueden ser considerados como propagación de OEM. Así, cuando recibimos «calor» y «luz» del Sol, cuando oímos la radio o vemos la televisión, cuando se utiliza un horno de microondas o cuando nos hacemos una «radiografía», estamos ante procesos diferentes pero que la ciencia explica mediante esta propagación con el nombre común de **radiación**.

En la física clásica, que se desarrolló hasta finales del siglo pasado y casi hasta los años 30 del s. XX, el mundo estaba formado por dos componentes fundamentales:

a) **La materia**, que constituía los cuerpos que podemos observar, en sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso, y en los que podíamos medir entre otras propiedades la masa y la energía.

b) **La radiación**, que no tenía substrato material, podíamos decir que estaba constituida por «energía en estado puro», que no tenía masa, ni cargas, y que se utilizaba para explicar transmisiones de energía sin transmisión neta de materia. Consideremos los ejemplos siguientes:

Del Sol recibimos luz y calor, pero esa luz y ese calor no se pueden tocar, no se pueden «coger», ni pesar, etc. Por otro lado, la luz y el calor pueden transmitirse en el «vacío», ya que entre el Sol y la Tierra no hay nada material. La energía emitida por el Sol se ha transmitido por radiación.

A través de la antena «parabólica» recibimos la señal de TV emitida por una emisora que se encuentra a miles de kilómetros de distancia; se recibe energía que tampoco tiene un soporte material, algo que se pueda coger o pesar. Esta «señal» que recibimos puede también propagarse en el vacío, ya que la recibimos desde un satélite artificial que se encuentra fuera de la atmósfera, al que previamente se ha mandado, desde la emisora central, la señal que hay que retransmitir. La energía emitida por la emisora se ha transmitido por radiación.

También el «calor» puede transmitirse sin ningún soporte material (al menos aparentemente). En una habitación de la que se haya extraído todo el aire, calentamos mediante una resistencia eléctrica una placa metálica; si esperamos un tiempo suficiente

podremos observar cómo otra placa que se encuentra alejada de la primera aumenta su temperatura, de forma que parece claro que se ha producido una transmisión de energía desde la placa más caliente a la fría, energía que se ha transmitido en el vacío, ya que como dijimos habíamos sacado todo el aire de la habitación y las placas estaban separadas sin nada que las uniera. El calor se ha transmitido por radiación.

De igual manera podemos referirnos a la energía que se transmite mediante los rayos X, las microondas, los rayos infrarrojos, los rayos ultravioletas, los rayos láser, la FM (frecuencia modulada) o la AM (amplitud modulada): en todos los casos se produce una transmisión de energía sin una transmisión (al menos aparente) de materia, y en todos los casos, esa energía se puede transmitir en el vacío, sin ayuda de ningún soporte material.

En términos actuales llamamos **calor** a la cantidad de energía intercambiada entre dos cuerpos debido a la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos.

9.2 Origen de las ondas electromagnéticas

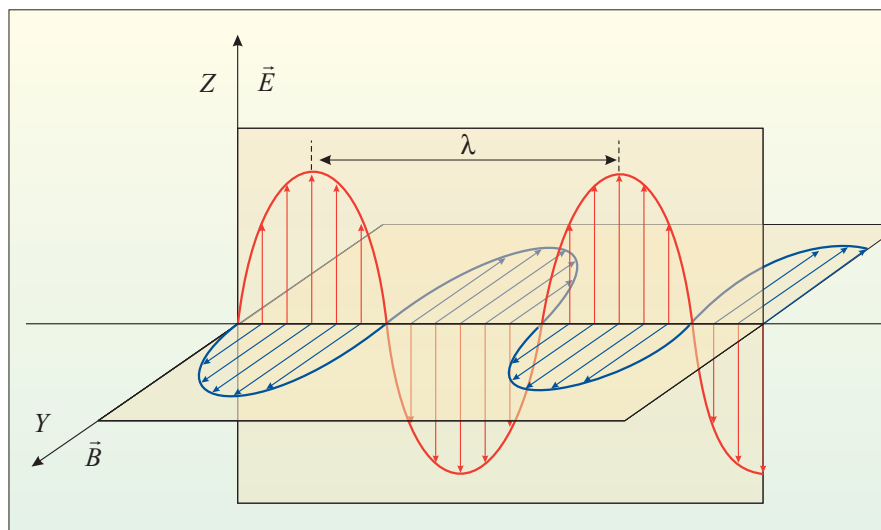
En la segunda mitad del siglo XIX, el físico James Clerk Maxwell pudo explicar todos los fenómenos eléctricos y magnéticos conocidos hasta ese momento con una única teoría que a su vez se sintetizaba en cuatro ecuaciones: las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, de las que algunos historiadores de la ciencia han dicho que quizás sean las ecuaciones que más han influido en el desarrollo de la sociedad. En ellas, Maxwell relacionaba los campos eléctricos y magnéticos, entre sí y con las cargas eléctricas tanto en reposo como en movimiento.

De las ecuaciones de Maxwell se desprende que una carga eléctrica que se mueva con aceleración producirá campos eléctricos y magnéticos variables, de tal forma que el campo eléctrico variable producirá un campo magnético variable y éste, a su vez, producirá un campo eléctrico variable, y así sucesivamente. De esta forma, la existencia de una carga eléctrica acelerada debe suponer la propagación en el espacio de dos campos, uno eléctrico y otro magnético, íntimamente relacionados entre sí y que pueden transportar energía desde un punto a otro sin transmisión de materia.

De las propias ecuaciones de Maxwell se deduce también que ambos campos, el eléctrico y el magnético deben ser perpendiculares entre sí y perpendiculares a su vez a la dirección de propagación de la perturbación. Esos campos son variables, es decir, su valor en un punto del espacio no es constante, pasando desde un máximo a un valor nulo y posteriormente a un valor máximo en sentido contrario (recordemos que \vec{E} y \vec{B} son magnitudes vectoriales). Si suponemos una OEM lineal en la dirección del eje X, tendremos campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo según una expresión del tipo:

$$E = E_0 \text{sen}(2\pi ft - kx)$$

$$B = B_0 \text{cos}(2\pi ft - kx)$$



La figura representa los valores de E y B en un instante determinado en una OEM que se propaga en la dirección del eje X.

En ambas expresiones aparece el mismo valor de f , que se corresponde a la frecuencia, es decir al número de veces que en un segundo el campo eléctrico o magnético alcanza un valor determinado. Esa frecuencia está relacionada con la frecuencia de oscilación de la carga que crea los campos magnéticos y eléctricos variables.

También se cumple que:

$$\mathbf{E}_0 = c \mathbf{B}_0$$

Así pues, de las ecuaciones de Maxwell se llega a la conclusión de que las cargas eléctricas aceleradas son capaces de producir una perturbación en el espacio (perturbación que se trata de un campo eléctrico y otro magnético variables perpendiculares entre sí) y que se propaga en el espacio perpendicularmente a la dirección de ambos campos.

Analogías entre una OEM y una onda transversal en una cuerda

a) Se produce transmisión de energía sin transmisión de materia.

b) La propagación se hace en la dirección perpendicular a la dirección en la que varían las magnitudes. En la cuerda, si cada punto de la cuerda vibra en dirección vertical, la propagación es en dirección horizontal. En el caso de los campos eléctricos y magnéticos la propagación es también perpendicular a la dirección en la que varía cada campo.

c) La frecuencia de vibración de un punto depende de la frecuencia de vibración de la causa que origina la perturbación. En la cuerda, según sea la frecuencia con la que hagamos oscilar el extremo de la misma, así será la frecuencia de los puntos de la cuerda. En los campos electromagnéticos, su frecuencia de vibración será igual que la frecuencia de vibración de la carga o cargas que los producen.

Esto hace que se pueda aplicar el mismo estudio formal matemático al movimiento de una cuerda que al fenómeno de propagación de una perturbación electromagnética. Por eso, a la propagación de esos campos electromagnéticos variables se les llama ondas electromagnéticas.

Diferencias entre una OEM y las ondas mecánicas transversales

La diferencia fundamental entre las ondas mecánicas transversales en una cuerda y las ondas electromagnéticas transversales es que mientras que las primeras necesitan de un soporte material (las partículas de la cuerda) para poder existir, las OEM pueden propagarse en el vacío, sin nada material que las soporte.

Además, mientras que la onda mecánica en una cuerda tiene una sola dirección de propagación, las OEM se propagan en todas las direcciones del espacio, de forma que el frente de onda (constituidos por todos aquellos puntos a los que la onda llega simultáneamente) tiene forma esférica con centro en el foco emisor de la onda.

El artículo «Una teoría dinámica del campo electromagnético» en el que Maxwell desarrolló la parte principal de su teoría lo presentó a la Royal Society el día 8 de diciembre del año 1864. Para que lo puedas situar históricamente, por esa época acababa de aceptarse la hipótesis de Avogadro, se estaba desarrollando la tabla periódica y podíamos decir que se estaba terminando de aceptar la teoría atómica. Pero aún no se sabía nada de la estructura interna de los átomos, no se había «descubierto» el electrón, y por lo tanto, la teoría sobre la estructura de la materia estaba aún casi sin desarrollar.

Maxwell murió en el año 1879 cuando sólo tenía 48 años. Su teoría, aún no había tenido un éxito reconocido por todos, pues aunque sus predicciones eran muy espectaculares, matemáticamente era y es una teoría difícil de analizar. Además, en esa época aún no se tenía evidencia experimental de las OEM.

Experiencias de Hertz

Heinrich Hertz (1857-1894), comprobó experimentalmente en 1888 las predicciones de la teoría electromagnética lo que supuso un gran apoyo para ésta. El dispositivo experimental utilizado por Hertz en sus experiencias fue relativamente sencillo, estaba constituido por un circuito oscilante capaz de emitir ondas electromagnéticas y una antena que no era más que una espira capaz de «recibir» esas ondas.

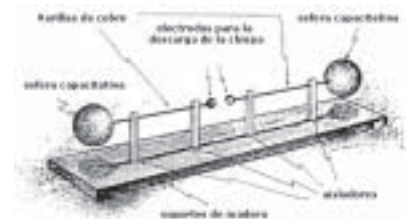
El dispositivo usado por Hertz para producir las OEM se trataba de dos varillas terminadas en uno de sus extremos por una pequeña esfera metálica, mientras que en el otro extremo tenía una esfera metálica mucho mayor. Las varillas metálicas estaban conectadas a una fuente de alta tensión que suministraba una gran cantidad de carga a las esferas hasta que saltaba una chispa entre ellas. En ese instante el aire se vuelve conductor y las cargas oscilan entre las esferas hasta alcanzar el equilibrio eléctrico. En definitiva, el dispositivo permitía que las cargas oscilasen entre las esferas y, por tanto, estuviesen aceleradas. Según la teoría de Maxwell se debía producir en este caso una OEM. Hertz utilizó una espira metálica (equivale a lo que llamamos antena) para verificar la existencia de tales ondas. Era un alambre doblado en forma de círculo con una abertura pequeña en sus extremos de forma que las variaciones del campo magnético en el espacio crearan una corriente inducida y por ello el salto de una pequeña chispa en sus extremos. Así se confirmó la existencia real de las OEM y de paso sirvió para «inventar» la radio. En honor a Hertz la unidad de frecuencia recibe el nombre de **hertzio** (Hz), y a las OEM correspondientes a las telecomunicaciones se les llama también ondas hertzianas.

Hertz consiguió producir OEM estacionarias, haciendo que se produjese la interferencia entre las OEM producidas y las reflejadas en una superficie conductora colocada relativamente próxima al sistema generador de ondas. Pudo comprobar la existencia de los nodos y vientres propios de las ondas estacionarias, y medir la longitud de onda. Ya sabes que la distancia entre dos nodos o dos vientres es igual a media longitud de onda. Puesto que conocía la frecuencia de la OEM que había producido, pudo calcular la velocidad de la OEM mediante la ecuación $c = \lambda f$.

La frecuencia de las OEM de Hertz era de unos 10^8 Hz y la longitud de onda que midió de unos 3 m, lo que supone que la velocidad de las OEM era de $3 \cdot 10^8$ m/s.



Heinrich Hertz



9.3 Valores característicos de las ondas electromagnéticas

La velocidad

Todas las ondas electromagnéticas tienen la misma velocidad. Esa velocidad es aproximadamente de 300 000 km/s en el vacío, pero puede cambiar de un medio a otro. En cualquier otro medio, la velocidad de propagación es menor que en el vacío. En el aire toma un valor parecido.

La velocidad de propagación de las OEM puede deducirse de la teoría electromagnética de Maxwell y está relacionada con la permeabilidad magnética μ y con la constante dieléctrica ε del medio en el que se propaga mediante la expresión:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

El valor más exacto medido hasta la actualidad de la velocidad de propagación en el vacío de las ondas electromagnéticas es de $299\,792\,456,2 \pm 1,1$ m/s

A.36.- Comprueba, con los valores de ε y μ correspondientes al vacío, que la velocidad de las ondas electromagnéticas es aproximadamente de 300 000 km/s.

Precisamente el hecho de que la velocidad de propagación de las OEM predicho por la teoría de Maxwell coincidiera con la velocidad de propagación medida experimentalmente es una prueba a favor de la teoría, una prueba de enorme importancia dado el carácter cuantitativo de la misma, ya que es poco probable que sea una «casualidad» la coincidencia del valor teórico predicho con el valor experimental.

Otro hecho de gran importancia fue que este valor coincidiese con el medido para la luz, por lo que ésta fue considerada como un tipo de OEM, y a partir de aquí, la Óptica pasó a estar integrada en el electromagnetismo.

Debemos recordar este valor de 300 000 km/s, pues es una constante universal; la teoría de la relatividad de Einstein predice que es el valor máximo que puede tener cualquier ente material y, hasta lo que se ha podido comprobar experimentalmente, parece que efectivamente es imposible alcanzar esa velocidad excepto por las OEM en el vacío.

La frecuencia

Cuando estudiamos el sonido nos referíamos a que la frecuencia es precisamente la magnitud física que caracteriza a un sonido para distinguirlo de otro. Así un sonido agudo es un sonido de frecuencia alta, mientras que un sonido grave es aquel que tiene una frecuencia baja.

Las OEM se distinguen unas de otras por su frecuencia. Las frecuencias de las OEM pueden variar entre límites muy amplios, desde unos miles de hertzios hasta miles de trillones de hertzios. Así mientras que las ondas de radio son de baja frecuencia, del orden de los kHz a los MHz, la luz está compuesta de OEM cuya frecuencia es del orden de 10^{14} Hz y los rayos gamma que se emiten en los procesos nucleares pueden ser del orden de 10^{20} Hz.

Puede parecer extraño que sea sólo la diferencia en el valor de la frecuencia lo que distinga a fenómenos tan dispares como puede ser la radiación térmica o la luz.³ Pero si nos fijamos en el proceso de radiación térmica de un cuerpo, nos daremos cuenta que nuestra piel lo percibe sólo cuando aumentamos la temperatura del cuerpo (pensemos en un metal que se calienta) y que, si seguimos aumentando la temperatura, llega un momento en el que no sólo percibimos la radiación térmica sino que nuestra vista comienza a percibir la radiación luminosa. Un progresivo aumento de temperatura va provocando un cambio en el color de la radiación luminosa, que en definitiva no es más que un cambio en la frecuencia de la OEM que constituye la luz.

Conviene tener presente que en la percepción tan diferente de esos procesos juega un papel muy importante la limitación de los sentidos humanos. De alguna manera es algo similar a lo que sucede con los sonidos, que sólo son percibidos en una franja estrecha de valores, quedando fuera de nuestro alcance los infrasonidos y los ultrasonidos. Existen películas fotográficas capaces de captar la radiación infrarroja (no captada por la vista humana) o la radiación ultravioleta.

La longitud de onda

La longitud de onda es la distancia que hay entre dos puntos que se encuentran en fase, es decir en el mismo estado. Su valor coincide con la distancia capaz de recorrer una onda en un tiempo igual al período. En cualquier onda, la relación entre la longitud

de onda, la velocidad y la frecuencia viene dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Puesto que la velocidad de propagación (en el vacío o en el aire), c , es la misma para todas las OEM, la longitud de onda es inversamente proporcional al valor de la frecuencia, de forma que aquellas OEM que tengan mayor frecuencia serán las que tengan menor longitud de onda.

A.37.- a) Una emisora de onda media emite con una frecuencia de 600 kHz. Calcula su longitud de onda en el aire.

b) La frecuencia de emisión de una emisora de frecuencia modulada (FM) es de 90 MHz, ¿cuál es su longitud de onda?

c) Un rayo láser emite una luz monocromática de una longitud de onda de $6 \cdot 10^{-7}$ m. ¿Cuál es su frecuencia?

d) Los rayos X son OEM de alta frecuencia. ¿Cuál será la frecuencia de unos rayos X que tienen una longitud de onda de 1 angstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m)?

a) $\lambda = 500$ m; b) $\lambda = 3,3$ m; c) $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz; d) $f = 3 \cdot 10^{18}$ Hz

A.38.- Haz un estudio del tamaño de las rendijas necesarias para que se produzcan la difracción de las OEM descritas en la actividad anterior.

La energía y el momento lineal de una onda electromagnética

Según la teoría de Maxwell puede demostrarse que la intensidad media de una OEM, es decir, la energía que se transmite por unidad de área normal a la dirección de propagación y por unidad de tiempo, depende de los valores máximos de las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos.

$$I = \frac{\Delta E}{S \Delta t} = \frac{1}{2} \frac{E_0 B_0}{\mu_0} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 c$$

De acuerdo con esta teoría de Maxwell, la intensidad de una OEM depende de la amplitud pero no depende de la frecuencia de la OEM. Esto originó dificultades al intentar explicar el efecto fotoeléctrico, que estudiaremos en un capítulo posterior.

Las OEM «transportan» cantidad de movimiento (momento lineal). La cantidad de movimiento transportada por la onda es igual a la energía transportada por la onda dividida por la velocidad de la luz. Cuando la luz «choca» con un obstáculo y es absorbida o reflejada por éste, le empuja debido precisamente a que la luz tiene momento lineal.

9.4 El espectro electromagnético

Ya hemos señalado que las OEM se presentan en una amplia diversidad de formas que se diferencian en la frecuencia y por consiguiente en la longitud de onda. Tradicionalmente se han distinguido amplias zonas que de alguna manera agrupan a las OEM que presentan un aspecto o una utilidad semejante para el hombre. Estas grandes zonas, que sólo tienen el interés de una clasificación aproximada, se solapan entre sí no existiendo unos límites perfectamente diferenciados de unas a otras, dado que no hay criterios científicos exactos para esa clasificación.

En el dibujo se muestran todas con sus valores de longitud de onda y frecuencia aproximados, aunque no se han tenido en cuenta con precisión los límites de cada banda.

VHF significa *very high frequency* (muy alta frecuencia), y UHF *ultra high frequency* (ultra alta frecuencia). Es una frecuencia mayor que la de VHF.

Ondas de radio

En ellas se incluyen las ondas de radio de AM (onda media, larga y corta) y FM, así como las de televisión, UHF y VHF. La longitudes de onda pueden variar desde algunos kilómetros hasta longitudes de onda de 0,3 metros (frecuencias desde unos pocos hasta 10^9 Hz).

Aunque en la actualidad los sistemas de producción pueden ser muy sofisticados, las cargas eléctricas cuyas oscilaciones producen estas OEM pueden ser aceleradas con circuitos eléctricos oscilantes, constituidos en esencia por el paso de las cargas desde un condensador a una autoinducción y viceversa.

Microondas

Su longitud de onda oscila entre 0,3 m y 1 mm (de 10^9 a $3 \cdot 10^{11}$ Hz). Junto a su conocida aplicación en «los hornos de microondas», se utilizan para el transporte de las señales de telecomunicación, tanto por cable como por satélite. Las antenas parabólicas, reciben la señal en forma de OEM con longitudes de onda comprendidas en el grupo de las microondas.

La forma de producción de las microondas es similar a los sistemas utilizados para las ondas de radio, sólo que tienen la capacidad de producir vibraciones más rápidas de las cargas oscilantes.

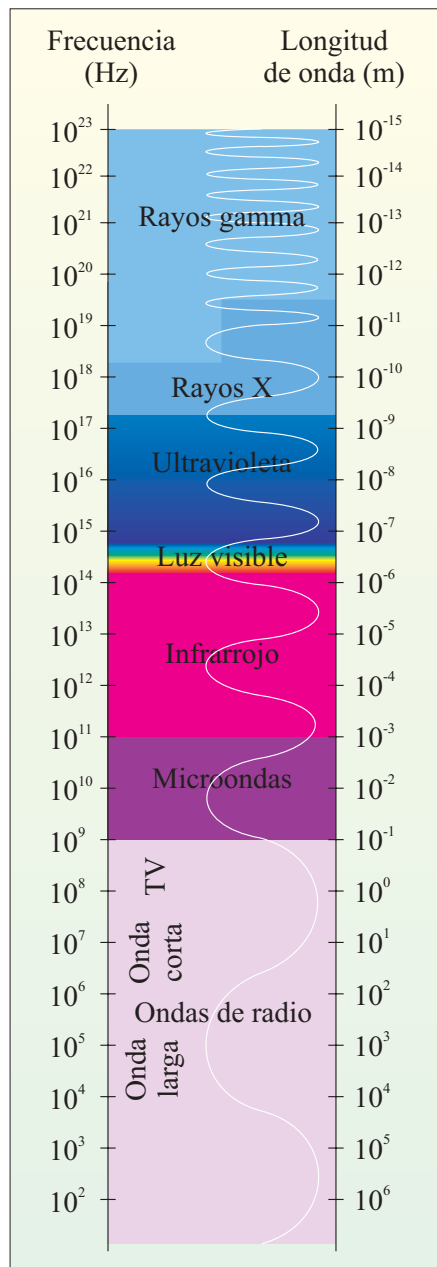
Infrarrojo

La longitud de onda oscila entre 1 mm y 0,00078 mm ($3 \cdot 10^{11}$ a $4 \cdot 10^{14}$ Hz). El infrarrojo (IR) corresponde a OEM emitidas por los cuerpos calientes, desde cualquier radiador doméstico hasta una lámpara de incandescencia. Casi la mitad de la energía radiante emitida por el Sol corresponde al IR. Las personas también emitimos radiación IR, lo que puede ser aprovechado para hacer fotografías que utilizan películas especiales capaces de ser impresionadas por la radiación infrarroja. Muchas de las imágenes utilizadas por los «parapsicólogos» en las que se ve el «aura extrasensorial» de las personas, no son otra cosa que fotografías infrarrojas.

Luz visible

En realidad lo que llamamos luz, no es más que una pequeña zona del espectro electromagnético. Son aquellas OEM con longitudes de onda comprendidas entre 7800 y 3900 Å ($4 \cdot 10^{14}$ a $8 \cdot 10^{14}$ Hz) que pueden impresionar nuestra retina produciendo el fenómeno de la visión. Los diferentes colores no son más que OEM de diferente frecuencia (y por lo tanto diferente longitud de onda). Unos valores aproximados para los diferentes colores pueden ser los que aparecen en el recuadro (los números se refieren a la longitud de onda expresada en Å).

La producción de OEM visibles se corresponde con las aceleraciones que pueden sufrir los electrones que constituyen la materia. Tanto los cuerpos que son fuentes de luz en sí mismos, como aquellos que lo que hacen es reflejar la luz, lo que les ocurre son procesos de aceleración de las cargas eléctricas (los electrones fundamentalmente) que los componen. Por eso, calentando un cuerpo que inicialmente no es una fuente de luz, podemos conseguir que se convierta en una fuente luminosa, pues lo que hacemos es favorecer las aceleraciones de los electrones que forman parte de determinados enlaces.



Ultravioleta

Su longitud de onda puede variar de los 8000 Å a los 6 Å ($8 \cdot 10^{14}$ a $3 \cdot 10^{17}$ Hz). Son OEM más «energéticas» que las visibles y entre otras cosas son responsables del «color moreno» que toma la piel cuando se expone al Sol. Pueden utilizarse como germicidas, es decir para matar a microorganismos patógenos. Los más energéticos producen efectos nocivos sobre los seres vivos, en concreto sobre el hombre parece que son responsables de los «cánceres de piel». La importancia de la capa de ozono que envuelve nuestra atmósfera es que nos protege de la radiación ultravioleta que procede del Sol. El origen de la radiación ultravioleta también se debe a las aceleraciones que sufren los electrones en átomos y moléculas.

La unidad es el Å
ULTRAVIOLETA < 3900
3900 < violeta < 4500
4500 < azul < 5000
5000 < verde < 5700
5700 < amarillo < 5900
5900 < naranja < 6100
6100 < rojo < 7800
7800 < INFRARROJO

Rayos X

La longitud de onda de estas OEM es muy pequeña, puede variar entre 10 y 0,06 Å (de $3 \cdot 10^{17}$ a $5 \cdot 10^{19}$ Hz), es decir del orden del tamaño de los átomos. Se producen al someter a aceleraciones muy grandes a partículas cargadas. Una forma de hacerlo es coger un haz de electrones, acelerarlos para conseguir que alcancen altas velocidades, y luego frenarlos muy deprisa haciéndolos chocar contra una placa. Esa aceleración de frenado es muy grande con lo cual emiten esta radiación tan energética. Los rayos X son peligrosos, y debemos ser cuidadosos en las exposiciones a los mismos, «las radiografías», tan alegremente utilizadas a veces. En estudios hechos con médicos americanos radiólogos se comprobó que su esperanza de vida era de 10 años menor que la de los otros médicos.

Rayos gamma

Son las OEM de mayor energía y frecuencia ($3 \cdot 10^{18}$ a más de $3 \cdot 10^{22}$) y menor longitud de onda. Se producen en los procesos nucleares y su poder de penetración es muy grande. Son los más peligrosos y ocasionan daños irreversibles en los seres vivos.

A.39.- a) Calcula la longitud de onda de la emisora de radio que sea tu preferida.

b) ¿Emitirán OEM los cables de corriente alterna? Si así fuera, ¿tendrían una longitud de onda larga o corta?

A.40.- En la teoría del átomo de Bohr se suponía que el electrón negativo estaba girando con rapidez constante alrededor del núcleo positivo. En los libros puede leerse que según la teoría electromagnética de Maxwell un átomo constituido de esa manera no puede ser estable, ya que el electrón caería sobre el núcleo. ¿Podrías explicar por qué debería caer el electrón sobre el núcleo, según la teoría electromagnética de Maxwell?

9.5 Polarización de las ondas electromagnéticas

Luz no polarizada. La luz emitida por la mayoría de las fuentes luminosas se debe a la existencia de cargas eléctricas (generalmente electrones) aceleradas. Según la dirección de la aceleración así será la dirección del campo eléctrico que forma parte de la OEM. Como la aceleración de cada uno de los electrones tendrá una aceleración con una dirección diferente, en las OEM de la mayoría de las fuentes luminosas el campo eléctrico oscilará en todas las direcciones que están contenidas en el plano perpendicular a la dirección de propagación. (El campo magnético asociado será siempre perpendicular al eléctrico).

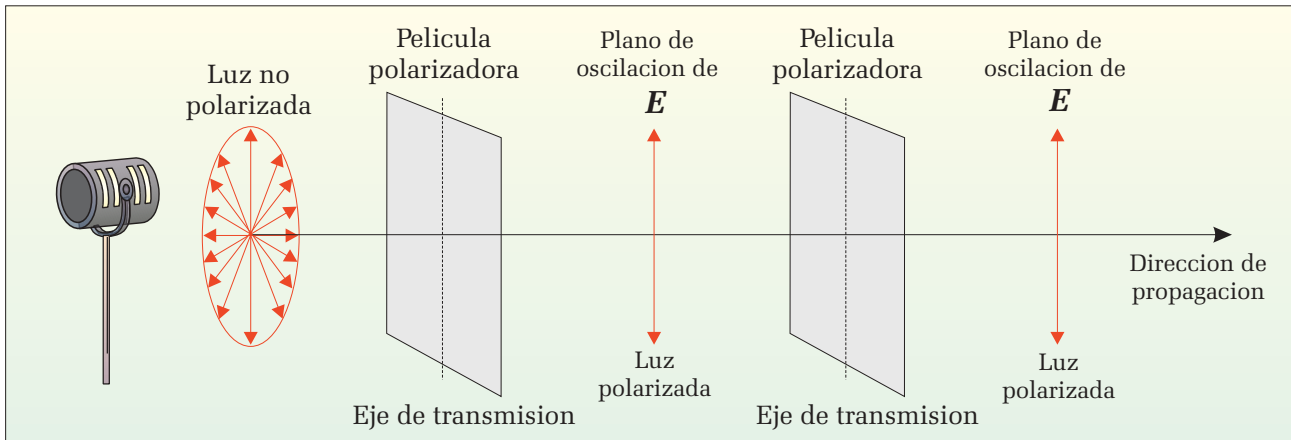
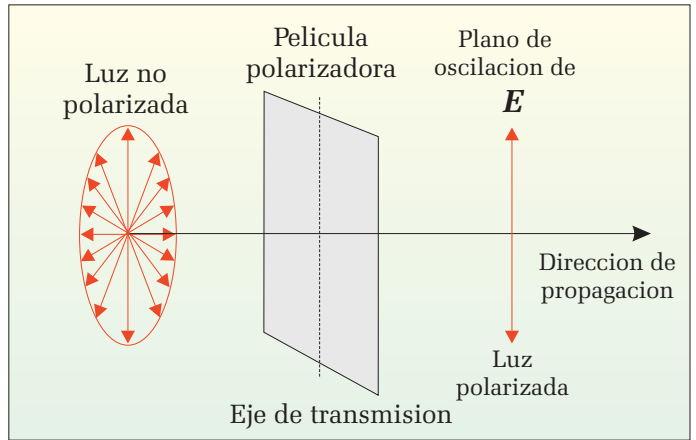
Luz polarizada. Se trata de OEM en las que el campo eléctrico oscila en una única dirección (siempre será perpendicular a la dirección de propagación). Hay varios métodos para conseguir obtener luz polarizada a partir de luz ordinaria. De ellos sólo describiremos brevemente los dos siguientes:

Polarización por absorción

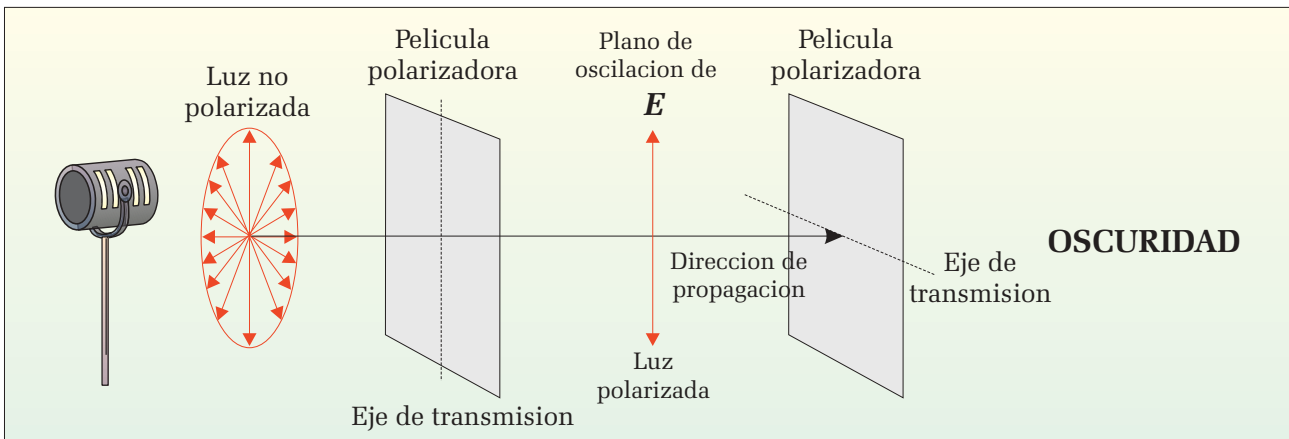
Hay materiales que absorben la fracción de la luz formada por OEM cuyo campo eléctrico tiene una determinada dirección y deja pasar la luz formada por OEM en las que el campo E es perpendicular a la dirección anterior. La dirección en la que el material deja pasar la luz se denomina eje de transmisión.

Si hacemos pasar la luz no polarizada a través de una película polarizadora, se observa una disminución de la intensidad de la luz transmitida pues parte es absorbida por la película.

Si ahora colocamos una segunda película polarizadora cuyo eje de transmisión sea paralelo al de la primera película dejará pasar toda la luz que dejaba la primera película.



Si giramos ese polarizador y lo colocamos de forma que el eje de transmisión sea perpendicular al de la primera película no deja pasar nada de luz.



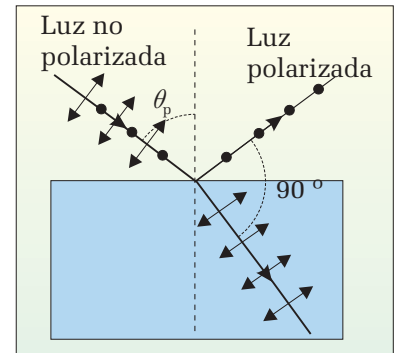
En caso de que los ejes de transmisión de las películas formen un cierto ángulo θ , se transmitirá una parte de la luz, que vendrá determinada por la ley de Malus:

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

Polarización por reflexión

Cuando la luz no polarizada se refleja en una superficie plana entre dos medios transparente, por ejemplo aire-agua, la luz reflejada está parcialmente polarizada. Cuando el ángulo de reflexión y el de refracción forman 90° , la luz reflejada está totalmente polarizada. El campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia mientras que en la onda refractada el campo eléctrico está incluido en el plano de incidencia.

Los cristales de las gafas antirreflectantes utilizan cristales polarizadores colocados de tal forma que sus ejes de transmisión sean verticales. Como la luz reflejada en la nieve da luz polarizada en la que el campo eléctrico oscila en un plano paralelo a la tierra no pasa a través de los cristales polarizadores de las gafas, evitando de esa forma el deslumbramiento producido por esa luz reflejada.



ACTIVIDADES DE RECAPITULACIÓN

A.1.- Explica la diferencia que existe entre la velocidad de una onda transversal que se propaga por una cuerda y la velocidad de un pequeño fragmento de cuerda.

A.2.- Un foco emite una onda de frecuencia 400 Hz y amplitud 2 cm, que se propaga a una velocidad de 1200 m/s. Determina la ecuación que define el estado de vibración de un punto situado a 8 m del foco. Halla también la elongación del punto en un instante en el que el foco lleva vibrando 10 s.

$$y = 2 \text{ sen } 2\pi (400 t - 8/3) \text{ cm}; y = 1,7 \text{ cm}$$

A.3.- Dado un movimiento ondulatorio de ecuación $y = 4 \text{ sen } 2\pi (2t - 0,5x)$ m, calcula la amplitud, el período, la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación de la onda.

$$A = 4 \text{ m}; T = 0,5 \text{ s}; f = 2 \text{ Hz}; \lambda = 2 \text{ m}; v = 4 \text{ m/s}$$

A.4.- En un punto F se está produciendo un MAS de 8 cm de amplitud y 20 Hz. Esta perturbación se propaga con una velocidad de 2 m/s.

a) Suponiendo que en el instante inicial el foco se encontraba en su posición de equilibrio, escribe la ecuación de la onda utilizando una función seno y utilizando una función coseno.

b) Calcula la velocidad y aceleración de un punto que se encuentra a 3 m del foco, 10 s después de iniciado el movimiento del foco.

$$y = 8 \text{ sen } 2\pi (20 t - 10 x) \text{ cm}; y = 8 \text{ cos}[2\pi (20 t - 10 x) - \pi/2] \text{ cm}; v = 10 \text{ m/s}; a = 0$$

A.5.- Dos fuentes sonoras oscilan en fase con frecuencia de 100 Hz. ¿Cuál será la diferencia de fase de las ondas procedentes de ambas fuentes en un punto que dista 5 m de una y 5,85 m de la otra? ($v_{\text{sonido}} = 340 \text{ m/s}$).

$$\pi/2 \text{ radianes}$$

A.6.- Dar dos razones por las que las ondas que se forman al tirar una piedra a un lago disminuyan su amplitud al propagarse alejándose del foco.

A.7.- Dos ondas tienen igual amplitud, pero la frecuencia de una de ellas es 1,8 veces mayor que la de la otra. ¿Transmite una más energía que la otra? Si así fuese, ¿cuál de ellas transporta más energía y cuántas veces más?

A.8.- Si una cuerda está vibrando en tres segmentos ¿habrá lugares en los que se pueda tocar con la hoja de un cuchillo sin que se perturbe el movimiento?

A.9.- La distancia que separa dos nodos consecutivos en un sistema de ondas estacionarias sonoras en el aire es de 40 cm. Calcula la frecuencia del sonido. (Supón que la velocidad del sonido es 340 m/s)

$$f = 425 \text{ Hz}$$

A.10.- Un movimiento ondulatorio de frecuencia 300 Hz se refleja en una pared. Como consecuencia se originan ondas estacionarias de forma que dos nodos consecutivos distan entre sí 0,4 m. Deduce la velocidad del movimiento.

$$v = 240 \text{ m/s}$$

A.11.- Las señales de radio de AM «pasan» mejor las montañas que las señales de FM. Dar una explicación sabiendo que la longitud de onda de las AM oscila entre 200 y 600 metros, mientras que la longitud de onda de FM está alrededor de 3 metros.

A.12.- Calcula la longitud de onda en el aire de un sonido grave ($f = 100 \text{ Hz}$) y de otro agudo ($f = 15000 \text{ Hz}$). ¿Se oirá el sonido, en cada uno de los dos casos, al otro lado de un muro de 5 metros de ancho por 5 de alto? ¿Por qué?

A.13.- Ondas en el agua se aproximan a un lugar en el cual cambia la profundidad. A consecuencia de ello, la velocidad de propagación pasa de 2,8 m/s a 1,8 m/s. Si las ondas incidentes forman un ángulo de 25° con la superficie vertical definida por el cambio de profundidad, ¿cuál será el ángulo de refracción?

A.14.- ¿Qué tienen que ver los campos eléctricos y magnéticos con la radiación térmica?

A.15.- Si, por desgracia, el Sol se «apagara» de repente ¿qué sería lo primero que dejaría de llegar a la Tierra: radiación infrarroja, luz visible o radiación ultravioleta?

A.16.- Haz un pequeño resumen en el que se recojan las características comunes a todas las OEM y aquellas otras que las diferencian.