

VÍDEO # 2

TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA LUZ

En el vídeo anterior, estuvimos analizando cómo los diferentes tipos de oscilaciones, como el sonido a través del aire, las ondas en una cuerda, o las olas en el mar, pueden llegar a comportarse cuando se propagan a través de un medio físico.

Vimos también que no existe un único tipo de onda, sino que, muy por el contrario, hay una amplia variedad de formas en la que los objetos pueden oscilar en 1, 2 y hasta 3 dimensiones.

Ahora, vamos a intentar describir algunas de las curiosas propiedades que la luz puede llegar a tener al propagarse por el espacio.

Aunque parezca algo extraño, la luz también presenta un comportamiento ondulatorio, como el sonido y el agua, pero con una sutil diferencia. Y es que, en el caso de la luz, lo que oscila no es algo tangible que podamos percibir con nuestros 5 sentidos, sino una entidad física, y un poco más abstracta, llamada Campo Electromagnético.

En 1880, el físico británico James Clerk Maxwell desarrolló una teoría para intentar explicar los fenómenos de la electricidad y el magnetismo que tanto fascinaban a los científicos de aquella época. Una tarea en la que se vieron involucrados montones de físicos de alto calibre, y cuyos hallazgos, ultimadamente, fueron sintetizados (y perfeccionados) por el propio Maxwell, en solo 4 elegantes ecuaciones. Unificando como consecuencia, los campos eléctrico y magnético, que en ese entonces se tenían como 2 entidades distintas, en uno solo: el campo electromagnético.

Estas ecuaciones, convenientemente llamadas “Ecuaciones de Maxwell”, son los pilares sobre los que se sustentan las bases del electromagnetismo.

Maxwell se dio cuenta, además, de que una perturbación en el campo eléctrico, independientemente de la causa, era capaz de producir ondas a través del mismo, y que estas, a su vez, perturbarían al campo magnético, generando otro conjunto de ondas que se propagarían perpendiculares, y en la misma dirección, a las ondas del campo eléctrico.

A toda onda eléctrica la acompaña siempre una onda magnética, y viceversa, y esta “pareja” de ondas, según Maxwell, tendría que viajar, en conjunto, a exactamente 299, 792, 458 m/s, o menos, dependiendo del medio en el que se propaguen.

La luz, por lo tanto, no es una onda mecánica como aquellas a la que estamos acostumbrados, sino que se trata de un tipo distinto de oscilación: una Onda Electro-Magnética, y mientras que las ondas mecánicas pueden ser transversales o longitudinales, las ondas electromagnéticas son siempre transversales. La dirección en la que viajan estas ondas se puede encontrar utilizando una técnica llamada

“regla de la mano derecha”. Para empezar, aislemos las componentes del campo eléctrico y magnético en un punto cualquiera del espacio. Ahora, simplemente debemos tomar nuestra mano derecha, de tal manera que nuestros dedos índice, medio, anular y meñique apunten todos en la misma dirección a la que apunta el campo eléctrico. A continuación, debemos cerrar nuestra mano, procurando que nuestros dedos pasen por la dirección en la que apunta el campo magnético. La dirección en la que apunta nuestro pulgar es la dirección hacia la cual la onda electromagnética se está propagando, y tiene un nombre especial: “Vector de Poynting”.

Una manera de visualizar estas ondas como las oscilaciones del agua en un estanque muy quieto. Una perturbación en el agua hace que pequeñas olas se propaguen en todas direcciones, y lo mismo ocurre con una perturbación en el campo electromagnético.

En la siguiente animación, las crestas de estas ondas (es decir, la parte más elevada) han sido coloreadas con tonos claros, mientras que los valles (las partes más bajas) con tonos más oscuros.

Recordemos que la distancia que separa a una cresta de otra, o un valle de otro, es la Longitud de Onda, mientras que la Amplitud mide la elevación máxima de una cresta, o la profundidad máxima de un valle.

En esta visualización, mientras más blanca sea una cresta, más elevada está, y lo opuesto con los valles, mientras más oscuros sean, mayor es la profundidad a la que se encuentran.

En el reino de la óptica, la amplitud de una onda de luz corresponde a qué tan intensa es. Mientras mayor sea la amplitud, más brillante se verá, y mientras menor sea la amplitud, más débil será la luz emitida.

Y mientras que, para el sonido, la longitud de onda y la frecuencia determinan lo aguda o grave que es una onda sonora, para las ondas electromagnéticas estas cantidades representan el color de la propia luz, siendo rojo el color con la longitud de onda más larga que podemos ver, y violeta, el de la longitud de onda más corta.

Más allá del rojo y del violeta, existen otros tipos de ondas electromagnéticas, llamados infrarrojos y ultravioletas, con longitudes de onda más grandes o más pequeñas, y que nuestros ojos ya no son capaces de percibir. Pero la historia no termina ahí. Si se sigue avanzando, en cualquier dirección, uno terminará encontrándose con ondas electromagnéticas cada vez más cortas, o más largas, y si ponemos todas estas ondas una al lado de la otra obtenemos lo que se conoce como el “Espectro Electromagnético”.

Desde las ondas de radio, que pueden llegar a medir varios kilómetros, pasando por las microondas, los infrarrojos, la luz visible, los ultravioletas, y los rayos x; hasta llegar a los rayos gamma, cuyo tamaño es menor al de los propios átomos; el

espectro electromagnético contiene todas las ondas de luz que uno puede llegar a imaginarse.

Acompañando a las crestas y los valles de estas ondas, también están los “rayos de luz”: líneas que viajan perpendiculares a las crestas y valles, y que apuntan, siempre, en la dirección hacia la cual se propaga la onda.

Dado que son más fáciles de visualizar (y de animar) que las ondas electromagnéticas, durante lo que sigue del vídeo utilizaremos los rayos de luz como ayuda visual para demostrar sus propiedades ópticas.

Los rayos de luz (y en consecuencia las ondas de luz) puede que no siempre viajen a la misma velocidad. Aun así, en todo caso y sin importar el material por el que viajen, los rayos de luz obedecen siempre a una ley fundamental de la naturaleza, que ha servido como piedra angular para la ciencia de la óptica: El Principio de Fermat.

Fue propuesto por primera vez en el año 1662 por el matemático Francés Pierre de Fermat, aunque, unos siglos después, se logró generalizar todavía más. El Principio de Fermat, en pocas palabras, dice que los rayos de luz tienden a seguir el camino que les toma menos tiempo cruzar; y es a partir de este hecho, que las leyes de reflexión y refracción a las que estamos tan acostumbrados, surgen.

Por ejemplo, cuando una onda electromagnética plana se topa con algún obstáculo, esta perturba a los electrones que habitan dentro de él, haciéndolos vibrar. En materiales donde los electrones tienen la suficiente libertad para moverse, estas vibraciones se pueden ir sumando hasta que, en conjunto, todos los electrones en la superficie del material acaban por generar otra onda electromagnética, con la misma intensidad de la onda original, pero que viaja en dirección contraria.

Esto es lo que produce el fenómeno de la reflexión.

Pero, ¿cómo funciona exactamente? ¿Cómo podemos saber hacia dónde y con qué ángulo va a reflejarse una onda electromagnética si la ponemos frente a, digamos, un espejo?

Para explicarlo, consideremos estos 2 puntos, llamados A y B, e imaginemos que hacemos salir un rayo de luz desde A, con la intención de que este se refleje en este espejo, y finalmente llegue al punto B. Tracemos, entonces, algunos de todos los posibles caminos que este rayo de luz podría tomar.

A simple vista, no hay una forma fácil de distinguir cuál de todas estas es la trayectoria (o trayectorias) verdaderas que observaríamos en el mundo real.

Algunos caminos parecen más plausibles que otros, claro, pero ninguno de ellos tiene cara de ser la o las “trayectorias definitivas”. Sin embargo, gracias a que conocemos el Principio de Fermat, sabemos que esta “trayectoria definitiva” tiene que ser la que tome menos tiempo entre ida y vuelta.

Entonces, con esto en mente, podemos intentar calcular el tiempo que el rayo de luz se ha tardado en ir del punto A al punto B para cada uno de los posibles caminos.

Para la gente en la audiencia, he aquí un pequeño reto: intenten deducir cuál de todos los caminos mostrados aquí en pantalla es la verdadera trayectoria que seguirá el rayo de luz desde A hasta B. Pausen el vídeo si sienten que necesitan más tiempo.

Pues resulta, que la trayectoria con menor tiempo entre ida y vuelta es aquella en la que el rayo de luz que entra y el rayo que sale, tienen el mismo ángulo de inclinación con respecto a una línea vertical imaginaria que llamaremos “vertical”.

En física, esto se conoce como la “Ley de Reflexión”.

Y, gracias al poder de las matemáticas, sabemos muy bien que esto se cumple, independientemente del ángulo de inclinación del rayo de luz; por lo que no es necesario calcular todos los tiempos de llegada si queremos saber la trayectoria real. Basta con usar esta simple ecuación, y listo.

Pero también hay ocasiones en las que una onda electromagnética incidente, en lugar de ser reflejada por el material, consigue penetrar a través de él, propagándose en su interior, como la luz del sol colándose por la ventana.

Esta libertad para propagarse a través de un material, como todo en la vida esta vida, viene con un precio.

Como habíamos visto antes, la velocidad de la luz es, a lo mucho, 299, 792, 458 m/s. Pero este “a lo mucho” solo se cumple cuando no hay nada que se interponga en su camino o, en otras palabras, esta es la velocidad de la luz en el vacío.

Cuando la luz se propaga a través de un medio como el aire, el agua, o un cristal, tiene que enfrentarse a una gran cantidad de obstáculos que poco a poco van frenando su marcha, haciendo que su velocidad disminuya, aunque sea un poquito. Tan poquito que es prácticamente imperceptible para el ojo humano.

Y cuando la luz quiere pasar con un cierto ángulo de incidencia desde un medio hacia otro, uno de sus dos extremos acabará llegando antes a la interfase y, por lo tanto, cambiará su velocidad antes que el otro extremo, que todavía no ha llegado a encontrarse con el material. Como consecuencia, la luz se ve forzada a modificar

la dirección en la que viaja. En concreto, su ángulo de salida se vuelve más pequeño con respecto a la vertical.

Este fenómeno es lo que popularmente se conoce como “Refracción”.

Pero, a diferencia de lo que ocurre para el fenómeno de la reflexión, en el caso de la refracción, los ángulos de incidencia y de refracción no están relacionados de manera lineal. En lugar de eso, es el seno de cada ángulo, o, dicho de otra manera, la componente vertical del rayo que entra y el que sale, los que se relacionan entre sí; y las constantes que hacen de esta relación una igualdad, son los índices de refracción N_1 y N_2 de los materiales por los que viaja la luz.

Estos índices de refracción son algo intrínseco de todos los materiales, y resultan de mucha utilidad para ayudar a predecir qué tanto va a disminuir la velocidad de la luz al pasar de un material a otro, y qué tanto se redireccionarán los rayos incidentes.

Imaginemos otro par de puntos en el espacio. El punto A se encuentra en un medio con un índice de refracción N_1 , mientras que el punto B se halla en otro medio, con índice de refracción mayor N_2 . Dado que N_2 es mayor a N_1 , la luz que venga de A, cambiará su velocidad al pasar de un medio a otro, disminuyéndola antes de llegar a B. Lo que, como consecuencia, cambiará su dirección también.

Veamos entonces, algunas de las posibles trayectorias que un rayo de luz podría tomar al viajar desde A hacia B, y calculemos cuánto tiempo le tomará al rayo pasar por cada una de ellas. De nuevo, instamos a la audiencia a que intenten encontrar el camino correcto que seguirá el rayo de luz, y que pongan pausa al vídeo si necesitan más tiempo para pensarlo.

Mientras mayor sea el índice de refracción en el medio por el que pasa la luz, mayor será la disminución en su velocidad, y menor será el ángulo, desde la línea vertical, con el que viajará a través de dicho medio.

Esta es conocida como la “Ley de Refracción”, o “Ley de Snell”, nombrada así en honor a su descubridor, el astrónomo holandés Willebrord Snell van Royen.

Gracias a estas 2 leyes tan simples y a la vez importantes, la humanidad ha sido capaz de desarrollar invenciones que, a pesar de ser parte de nuestro día a día en pleno siglo XXI, fueron una gran revolución durante su momento. Un ejemplo de esto son los espejos. Los cuales, al ser lo suficientemente planos y tener una cantidad mínima de imperfecciones, ayudan a que un gran porcentaje de los rayos

incidentes se reflejen sin sufrir un cambio brusco en el ángulo de salida (cosa que sí ocurre en los materiales rugosos, donde los rayos salen reflejados a lo loco).

Y, por otro lado, los lentes, capaces de tomar todos los rayos de luz que provengan de un punto en un objeto, y redireccionarlos para que converjan en otro punto, creando una imagen perfecta (o casi perfecta) del objeto.

Más adelante, nos adentraremos más a fondo en el funcionamiento de los diferentes tipos de lentes, el cómo la forma que estos tengan puede afectar a la imagen que se produce, creando o distorsionando las imágenes que reciben; y sus aplicaciones en nuestro mundo cotidiano.

Todo eso y más, en el próximo vídeo.

FIN