

Physica

Conceptos fundamentales de Física en 2º de Bachillerato

I.E.S. Aguilar y Cano

La luz y las ondas electromagnéticas

J.M.L.C.

La luz y las ondas electromagnéticas

En 1865, Maxwell publicó su teoría dinámica del campo electromagnético. En ella se establecían dos conclusiones:

- Un campo magnético variable con el tiempo induce un campo eléctrico proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético y de dirección perpendicular a aquél.
- Un campo eléctrico variable con el tiempo induce un campo magnético proporcional a la rapidez con que cambia el flujo eléctrico y de dirección perpendicular a aquél.

Así como la primera conclusión tenía una base experimental en la inducción, la segunda era establecida por Maxwell a partir de la creencia de que la relación entre el campo magnético y el eléctrico no podía ser solamente unívoca, sino que también tenía que ser simétrica. Esto fue lo que le llevó a establecer la segunda conclusión. La consecuencia de esta teoría es clara *una carga eléctrica que posee un movimiento acelerado crea una perturbación electromagnética.*

La razón es que una carga eléctrica en movimiento produce un campo eléctrico variable que da lugar también a un campo magnético variable que, a su vez, crea un campo eléctrico variable, y así sucesivamente. En consecuencia, la perturbación electromagnética se extiende o propaga.

Ondas electromagnéticas

El fenómeno de perturbación electromagnética más interesante es aquel en el que el movimiento acelerado de las cargas es oscilatorio. Éste sería, por ejemplo, el caso de una simple carga que oscila o el de un dipolo oscilante. Una carga eléctrica que se encuentra oscilando con cierta frecuencia origina a su alrededor un campo eléctrico que varía periódicamente con la misma frecuencia. Dicha variación del campo eléctrico produce un campo magnético que varía también con la misma frecuencia. Así pues, la perturbación producida por la carga oscilante se propaga en forma

ondulatoria en todas las direcciones. Así pues, podemos concluir que *una onda electromagnética es la perturbación periódica de los campos eléctrico y magnético asociados, que se propaga por el espacio.*

Fijémonos ahora en algunas características de la propagación de las ondas electromagnéticas:

- En cada punto del espacio, los valores de E y B varían periódicamente con el tiempo. Sin embargo, teniendo en cuenta la perpendicularidad de estos vectores, observamos que las oscilaciones de ambos se producen en planos perpendiculares entre sí. Las oscilaciones de los dos vectores están en fase.
- La dirección de propagación de la onda electromagnética es perpendicular a las direcciones de los vectores oscilantes E y B y viene determinada por la dirección del vector que se obtiene del producto vectorial $E \times B$. En consecuencia, **las ondas electromagnéticas son transversales.**
- La velocidad a la que se propagan las ondas electromagnéticas en el vacío, deducida por Maxwell, es de aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s. La coincidencia de este valor con el deducido por Fizeau llevó a Maxwell a la conclusión de que la propia luz es una perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan. Así pues, podemos resumir diciendo que:

Las ondas electromagnéticas son ondas transversales que se propagan en el vacío a la velocidad constante de la luz.

Esta velocidad de propagación es independiente de la longitud de onda. La sorprendente predicción de Maxwell acerca de la existencia de las ondas electromagnéticas se vio confirmada poco después por Hertz, quien consiguió producir y detectar las ondas de radio,

que, en su honor, suelen denominarse ondas hertzianas.

Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todas las radiaciones de diferente frecuencia en que puede descomponerse la radiación electromagnética. Dado que la velocidad de propagación de todas ellas en el vacío es la misma, entonces la frecuencia y la longitud de onda se relacionan según la expresión:

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

El espectro electromagnético se divide tradicionalmente en siete zonas. Sin embargo, esta división no presenta límites nítidos. Veamos las características de las ondas correspondientes a las zonas del espectro:

Ondas de radio. Son las que tienen una longitud de onda más larga: desde millones de metros hasta unos 30 cm (frecuencia entre 10^2 y 10^9 Hz). En este intervalo encontramos las ondas largas de radio, cuyas longitudes de onda son del orden de kilómetros; las de radio AM (centenas de metro), las de FM y televisión (metros) y las de onda corta (centímetros).

Microondas. Comprenden el intervalo de longitudes de onda que abarca desde los 30 cm hasta 1 mm (frecuencia entre 10^9 y $3 \cdot 10^{11}$ Hz). El rango de frecuencias de las microondas coincide con las frecuencias de resonancia de vibración de las moléculas de agua, lo que ha popularizado su empleo en las cocinas de los hogares (horno microondas) para la cocción de los alimentos (que tienen un elevado contenido de agua). Igualmente, su facilidad para penetrar en la atmósfera ha hecho que se utilicen en las

Contenido

La luz y las ondas electromagnéticas.....	1
Espectro electromagnético.....	1
Interferencia de la luz.....	2
Dispersión de la luz.....	2

comunicaciones con vehículos espaciales.

Infrarrojo (IR). Sus longitudes de onda se extienden desde 1 mm hasta los 10^{-6} m, aproximadamente (frecuencia entre $3 \cdot 10^{11}$ y $3 \cdot 10^{14}$ Hz). Son emitidas por cuerpos calientes, como las brasas de una chimenea. Prácticamente la mitad de la energía radiada por el Sol corresponde a este tipo de radiación.

Visible. Se denomina así porque es la que nuestros ojos son capaces de captar. A este tipo de ondas es al que nos referimos comúnmente como «luz» y constituye la región más estrecha del espectro, pues abarca sólo las longitudes de onda comprendidas entre 10^{-6} m y 390 nm (frecuencias entre $3 \cdot 10^{14}$ y $7 \cdot 10^{14}$ Hz). Se subdivide, a su vez, en los famosos colores del arco iris: Rojo: 620 a 1000 nm; Naranja: 590 a 620 nm; Amarillo: 550 a 590 nm; Verde: 490 a 550 nm; Azul: 430 a 490 nm; Violeta: 390 a 430 nm.

Ultravioleta (UV). Como su nombre indica, son las radiaciones que se encuentran «más allá del violeta», con longitudes de onda que abarcan desde los 390 nm hasta 1 nm (frecuencias entre $7 \cdot 10^{14}$ y $3 \cdot 10^{17}$ Hz). Su energía es suficiente para romper enlaces químicos o producir ionizaciones. Es la responsable del tono moreno de nuestra piel al tomar el sol. Fueron descubiertos por Johann Ritter en 1881.

Rayos X. Sus longitudes de onda se encuentran comprendidas entre 1 nm y 10^{-11} m (frecuencias entre $3 \cdot 10^{17}$ y $3 \cdot 10^{19}$ Hz). Así pues, el tamaño de estas longitudes de onda es equiparable al de los átomos y a las distancias interatómicas en los cuerpos sólidos. Esto los ha convertido en instrumentos especialmente útiles en cristalografía a la hora de determinar las disposiciones atómicas en un cristal por el método de difracción de rayos X, así como en medicina, donde se emplean en las radiografías. Su elevada energía los hace especialmente peligrosos, por lo que las dosis aplicadas en las radiografías se miden cuidadosamente.

Rayos gamma (γ). Sus longitudes de onda van desde los 10^{-11} m, donde acaban los rayos X, hasta perderse en valores infinitesimales (frecuencias superiores a $3 \cdot 10^{19}$ Hz). En consecuencia, su frecuencia es elevadísima, así como su energía, lo que hacen que sean muy peligrosos para cualquier forma de vida. Sin embargo, han encontrado

curiosamente gran utilidad en la radioterapia para combatir las células cancerosas. Las pequeñísimas longitudes de onda hacen que, en este caso, la naturaleza corpuscular prevalezca sobre la ondulatoria. Se producen en el transcurso de las reacciones nucleares y sólo son absorbidos por el plomo o el hormigón a partir de cierto grosor.

Interferencia de la luz

Ya hemos analizado los fenómenos de interferencia de las ondas en general. En el caso de la luz, el descubrimiento de este fenómeno, junto al de la difracción, aclararon su naturaleza ondulatoria al propagarse. Si el fenómeno de interferencia puede producirse en la luz, se manifestará como un patrón de claroscuros, es decir, como una secuencia alternada de zonas iluminadas y oscuras.

Thomas Young (1773-1829) demostró, en un experimento ya clásico realizado en 1801, que el fenómeno de las interferencias se producía también en la luz. Pero para ello debe cumplirse la llamada **condición de coherencia**, que establece que:

Para que se produzca interferencia observable entre las luces procedentes de dos focos distintos, éstas deben ser coherentes, es decir, deben tener la misma longitud de onda y una diferencia de fase constante.

Esta condición de coherencia explica la dificultad que entrañaba observar interferencias luminosas. Sin embargo, si los dos focos poseen frecuencias distintas o si su diferencia de fase cambia aleatoriamente con el tiempo, no se producen fenómenos de interferencia estacionarios. En este caso, los focos se denominan incoherentes.

En general, las luces de dos focos luminosos distintos, producidas por las emisiones aleatorias y desacompañadas de los átomos, nunca serán coherentes. Por esa razón, es imposible observar patrones de interferencia correspondientes, por ejemplo, a los dos focos de un coche, ya que no cumplen la condición de coherencia. Sin embargo, existe un método para conseguir dos focos coherentes que fue el empleado por Young para demostrar experimentalmente la interferencia. Consiste en dividir en dos la luz procedente de un foco

luminoso distante al hacerla pasar por sendas rendijas.

Dispersión de la luz

Un haz luminoso cualquiera es una mezcla de ondas de frecuencias (y, por consiguiente, de colores) muy variables. En el vacío, la velocidad de propagación de la luz es la misma, independientemente de la frecuencia. Sin embargo, en determinados medios materiales, la velocidad de propagación sí es función de la frecuencia.

Si observamos cómo varía el índice de refracción para diversos materiales (utilizados frecuentemente en óptica), esta vez con la longitud de onda; en todos los casos se saca una conclusión común: el índice de refracción aumenta ligeramente a medida que la longitud de onda disminuye. Es decir:

El índice de refracción aumenta ligeramente con la frecuencia.

Cuando un medio tiene esta dependencia entre el índice de refracción y la frecuencia, se dice que presenta dispersión. Este fenómeno fue el que observó Isaac Newton al hacer que los colores de la luz blanca se dispersaran al atravesar un prisma. Cuando la luz blanca incide en dirección oblicua sobre una de las caras del prisma, sufre refracción al entrar en él. Sin embargo, como el índice de refracción depende de la frecuencia, cada color sufrirá su refracción particular en distinto ángulo. Puesto que el índice de refracción es mayor para el violeta y el azul y menor para el rojo, los colores que más se desvían son los dos primeros. De esa manera, al salir del prisma y sufrir una segunda refracción, los colores aparecen claramente divididos.

La imagen que se recoge en la pantalla, donde aparecen los colores claramente diferenciados, se denomina espectro continuo de la luz blanca. El poder separador de un prisma depende del material transparente utilizado. La desviación del conjunto del haz al atravesar el prisma suele medirse en función del ángulo de desviación de la luz amarilla, que aparece equidistante del rojo y del violeta. Por otra parte, el ángulo que abarca el abanico de los colores dispersados nos da la medida de la dispersión del prisma. La desviación y la dispersión están directamente relacionadas, de modo que cuanto mayor es la primera, mayor es también la segunda.