

Naturaleza de la luz: onda-corpúsculo

Manuel Alonso Sánchez
IES Leonardo da Vinci (Alicante)

Presentamos un conjunto de actividades para la enseñanza-aprendizaje de fenómenos, conceptos y modelos sobre la luz. Se adopta el debate histórico acerca de su naturaleza (corpúscular u ondulatoria) como hilo conductor, poniendo a prueba uno u otro modelo para explicar fenómenos y experiencias característicos de la luz.

PALABRAS CLAVE

- NATURALEZA DE LA LUZ
- MODELO CORPUSCULAR
- MODELO ONDULATORIO
- ONDA ELECTROMAGNÉTICA
- DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

La física de 2.º de bachillerato incluye contenidos de óptica en varios temas de física clásica y de introducción a la física moderna. Teniendo esto en cuenta venimos elaborando un tema sobre la luz que usa el debate histórico acerca de su naturaleza (corpúscular u ondulatoria) como hilo conductor. Dicho tema se expone en formato digital en nuestra página web,¹ que incluye recursos variados para reforzar el estudio y en donde los alumnos contribuyen con experimentos y trabajos bibliográficos. En el aula se sigue una metodología de enseñanza de la física como investigación, implementando programas-guía de actividades (Gil y Martínez Torregrosa, 1987).

El debate sobre la naturaleza de la luz se plantea en tres temas del curso:

- En el tema de óptica, en el que se estudian varios fenómenos luminosos, mostrando la mayoría de ellos a través de experiencias. Se pide a los alumnos que utilicen uno y otro modelo para explicarlos, y se concluye adoptando el modelo ondulatorio.
- En el tema de electromagnetismo, donde se introducen las ondas electromagnéticas (oem). Se calcula su velocidad de propagación y se afianza el modelo ondulatorio.
- En el tema de cuántica, que comienza usando el modelo ondulatorio para emitir hipótesis sobre el efecto fotoeléctrico. Se aprovecha la

falta de concordancia entre predicciones y resultados experimentales para proponer una nueva versión del modelo corpuscular en el marco de la física moderna, y se termina planteando la dualidad onda-corpúsculo, aplicable no sólo a la luz sino a la naturaleza en general.

Todas las actividades de estos temas se exponen en los programas-guía, disponibles en nuestra página web. Aquí se han seleccionado algunas, casi todas del tema de óptica, cuyo enunciado se presenta seguido de un comentario explicativo.

Naturaleza, propagación y percepción de la luz

Actividad 1

Dad ejemplos de fuentes de luz propia. ¿Qué proceso genera la luz en cada una?

Actividad 2

Intentad explicar que:

- Se pueden ver objetos que no emiten luz propia.*
- Desde distintos lugares se puede ver un mismo objeto.*

El análisis de las fuentes de luz (bombilla, estrella...) muestra que en ellas ocurre un proceso (termoiónico, nuclear...) que emite energía. El hecho de que se pueda ver el resto de objetos cuando son iluminados hace concebir el concepto de fuente secundaria. Como las fuentes (primarias o secundarias) se pueden ver desde diferentes lugares, emiten la luz en todas las direcciones. Por tanto, se concluye que **la luz es energía que se genera en una fuente y se propaga en todas las direcciones.**

Actividad 3

Intentad explicar por qué de noche no se ve todo el cielo iluminado, sino únicamente puntos luminosos.

Otro concepto básico es la **invisibilidad de la luz**. Los alumnos pueden reforzarlo con experimentos que constatan que los rayos luminosos son invisibles pero se pueden mostrar intercalando un medio dispersivo (imagen 1).

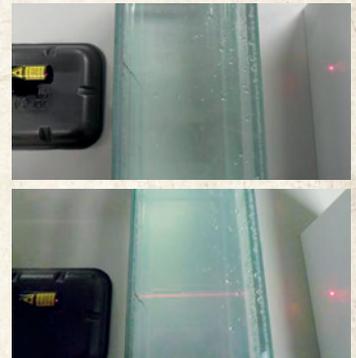


Imagen 1. En la imagen superior, invisibilidad del rayo de luz emitido por el láser. En la imagen inferior, la dispersión de la luz con una gotita de leche hace «visible» el rayo.

(Imágenes tomadas en el laboratorio por alumnos e incorporadas al tema en nuestra página web.)

¿La luz es una onda o un chorro de partículas?

En este apartado se ponen a prueba el **modelo ondulatorio** y el **modelo corpuscular de la luz**, según su capacidad para explicar fenómenos luminosos sencillos: refracción, difracción e interferencias, dispersión, efecto Doppler y polarización.

Actividad 4

¿Cuál podría ser el mecanismo en la propagación de la energía luminosa?

Con anterioridad, los alumnos han estudiado en otros fenómenos de propagación de energía el modelo de partículas y el modelo de ondas. El profesor señala la importancia que ha tenido históricamente la confrontación entre ellos y comenta propuestas que se plantearon en la antigüedad al afrontar el problema de la visión. Como precedentes del modelo corpuscular cabe citar a Pitágoras (siglo VI a. de C.) y a Platón (siglo V a. de C.), quienes supusieron que del ojo emanaban partículas luminosas que chocaban con el cuerpo observado. También a los atomistas, como Demócrito, que plantearon que los cuerpos emitían átomos de distintas formas y tamaños, portando aspectos de su imagen. Como antecedente del modelo ondulatorio tenemos la propuesta de Aristóteles (siglo IV a. de C.), quien planteó que podíamos observar los objetos por una modificación del medio interpuesto entre el ojo y ellos, y añadió que si alrededor del ojo se hiciese el vacío la visión sería imposible.

Tras esta introducción, el profesor, para avanzar en el debate sobre la naturaleza de la luz, irá planteando experiencias y pedirá a los alumnos que intenten explicarlas usando ambos modelos.

Actividad 5

Estudiad experimentalmente la refracción e intentad explicarla con ambos modelos.

Los estudiantes, después de realizar experiencias sencillas que les propone el profesor, deben **explicar los resultados aplicando el principio de Huygens**, que han estudiado antes en el tema relativo a las ondas (imagen 2). El profesor informa de que Huygens (1678) consideró la luz como una onda mecánica semejante al sonido y por ello longitudinal.

Para explicar la refracción con un modelo corpuscular, los alumnos pueden suponer que, al incidir las partículas luminosas desde el aire, la superficie del vidrio se opone a su movimiento; sin embargo, si así fuera, el resultado esperado no coincidiría con el experimental (imagen 3 de la página siguiente). Para solventar este escollo, Newton formuló una suposición distinta, brillante pero errónea: planteó que las partículas luminosas eran atraídas por el vidrio con mayor intensidad que antes por el aire (imagen inferior).

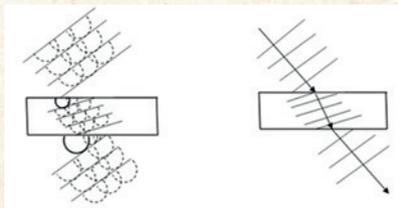
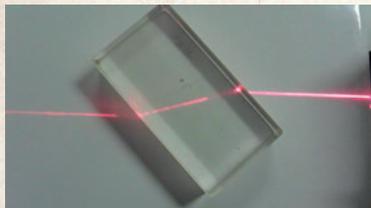


Imagen 2. A la izquierda, una fotografía tomada por los alumnos de la doble refracción aire-vidrio-aire. A la derecha, interpretación del proceso utilizando cualitativamente el principio de Huygens

Tras este breve repaso de los modelos de Newton y Huygens, se plantean seguidamente algunos de los grandes avances que impulsaron el modelo ondulatorio en el siglo XIX.

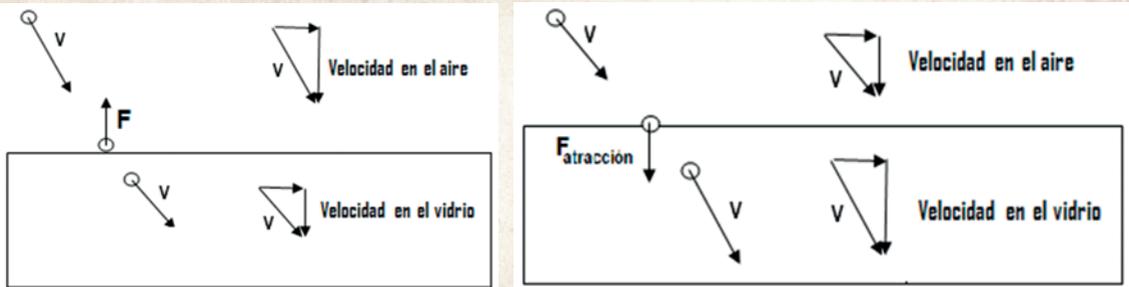


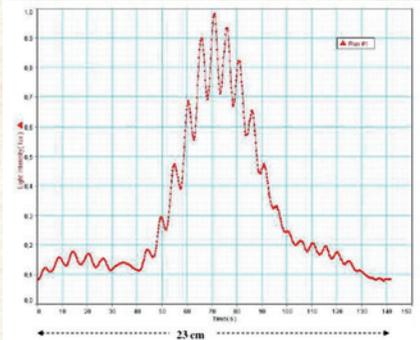
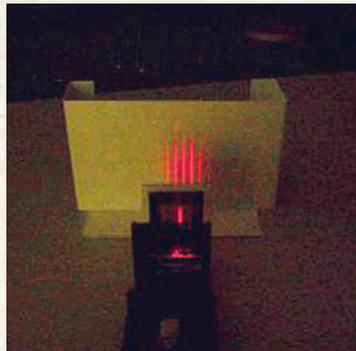
Imagen 3. Interpretaciones de la refracción aire-vidrio con un modelo corpuscular de la luz. A la izquierda, se plantea que el vidrio frena a las partículas luminosas y provoca que se desvíen separándose de la normal. A la derecha, se plantea la interpretación de Newton, según la cual el vidrio atraería a las partículas luminosas con mayor intensidad que el aire

Actividad 6

Realizad experimentos sobre difracción e interferencias que propone el profesor.

Los alumnos han estudiado antes estos procesos aplicados a las ondas mecánicas y han hecho experimentos con la cubeta de ondas. Con esta base interpretan las franjas obtenidas cuando un rayo láser atraviesa una red de difracción (imagen 4, izquierda) como una evidencia del carácter ondulatorio de la luz. En el laboratorio tenemos sensores con los que también se pueden realizar experimentos cuantitativos (imagen 4, derecha). Se pueden consultar los detalles en nuestra web y en un trabajo de Soler y Oliver (2009).

Imagen 4. Dos resultados experimentales aportados a la web por alumnos. A la izquierda, franjas de interferencia tras atravesar un rayo de luz láser una red de difracción. A la derecha, registro de intensidad luminosa, con un sensor de luz, obtenido en una réplica del experimento de la doble rendija de Young



La difracción y las interferencias luminosas son una buena ocasión para reflexionar sobre el papel que juegan tanto los resultados experimentales como la fundamentación teórica en la construcción de un modelo científico. Así, podemos comentar que en 1818 Fresnel presentó a la Academia Francesa de las Ciencias una memoria para fundamentar el modelo ondulatorio. Poisson, partidario del modelo corpuscular, usó las ecuaciones de

Fresnel para hacer una predicción que parecía absurda: se debía obtener un punto brillante en el centro del patrón de difracción de un disco circular opaco. No obstante, cuando Arago realizó la experiencia, verificó esa predicción tan poco intuitiva (imagen 5) y, lo que en principio era un argumento para rechazar el modelo ondulatorio, se convirtió en un argumento favorable.

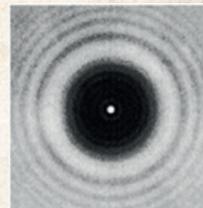


Imagen 5. Punto de Arago o de Poisson

Actividad 7

Comprobad la dispersión de la luz por un prisma y explicadla con ambos modelos.

La explicación que dan los alumnos de este fenómeno (imagen 6) con un modelo corpuscular no dista mucho de la del propio Newton (1703): «la luz está compuesta por una granizada de corpúsculos luminosos (de distinto tipo según el color de cada uno) que se propagan en línea recta y atraviesan medios transparentes».



Imagen 6. Dispersión de la luz blanca a través de un prisma. (Imágenes tomadas por alumnos e incorporadas a la web.)

No obstante, a estas alturas ya se sienten más cómodos con la interpretación posterior de Young, quien en su modelo ondulatorio utilizó el concepto de que cada color de luz corresponde a una longitud de onda diferente. En este punto, el profesor presenta el espectro de luz visible, dando el rango de valores de la longitud de onda. Los alumnos aplican cualitativamente el principio de Huygens a la refracción aire-vidrio y constatan así que la luz violeta, de menor longitud de onda, se acerca más a la normal y, por tanto, se desvía más que la luz roja (véase la imagen 2, derecha).

Actividad 8

Aplicad el efecto Doppler a la luz.

Los alumnos han estudiado el efecto Doppler en el tema de ondas y aquí predicen el desplazamiento de la longitud de onda recibida respecto de la emitida cuando la fuente luminosa se aleja o se acerca al observador. El profesor informa de que la luz que se recibe en observatorios astronómicos procedente de otras galaxias tiene una longitud de onda mayor que la emitida. Este hecho se interpretó como una prueba de que las galaxias se alejan entre sí y contribuyó a formular la teoría del Big-Bang (imagen 7).

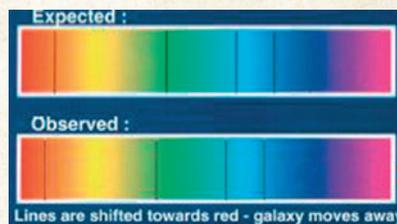


Imagen 7. Comparación entre el espectro de luz observado de una galaxia y el espectro esperado si estuviera en reposo

Actividad 9

Realizad experimentos que propone el profesor sobre polarización.

En uno de ellos se coloca debajo de una caja de cartón una lámpara encendida y encima, dos filtros polarizadores.

Al inicio sus planos de polarización tienen la misma orientación y luego se gira uno, provocando una oscilación en la intensidad luminosa registrada (imagen 8). El profesor explica que, como los filtros son perpendiculares a la dirección en la que se propaga la luz, la polarización indica que las ondas luminosas son transversales y no longitudinales como había supuesto Huygens.

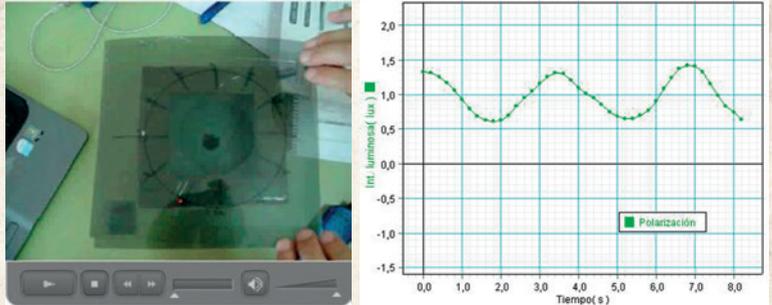


Imagen 8. Video y resultado del experimento sobre la polarización de la luz realizado por alumnos e incorporado a la página web

Otra experiencia interesante empieza colocando un pedazo de celofán con varios dobleces entre dos filtros polarizadores: se observa un mosaico de colores. Se va rotando uno de los filtros y los colores de los cuadros del mosaico van variando hasta que, tras girar 90° , cambian a sus complementarios. Esto se debe a que el desfase que sufre la luz al atravesar el celofán depende de su frecuencia y del espesor de celofán.

La polarización es un buen tema para pedir un trabajo bibliográfico sobre sus aplicaciones: gafas de cristal polarizado, polariscopio, etc.

La teoría electromagnética y la naturaleza de las ondas luminosas

En el tema de óptica se han recorrido los principales avances que afianzaron el modelo ondulatorio en la primera mitad del siglo XIX. Durante todo ese desarrollo ha permanecido latente o, en todo caso, no se ha aclarado una cuestión fundamental: ¿qué es lo que vibra en las ondas luminosas? En el tema de electromagnetismo se estudia la rúbrica que tuvieron esos avances a finales de aquel siglo y se responde a esta cuestión. Tras estudiar el campo electromagnético y su propagación mediante oem, se plantea la siguiente actividad.

Actividad 10

Calculad la velocidad de propagación de las oem en el vacío (Datos, $K=9 \cdot 10^9$ S.I., $\epsilon_0=4\pi 10^{-7}$ S.I.) ¿Qué sugiere el resultado?

Los alumnos obtienen en este cálculo la velocidad de la luz y el profesor les informa de que Maxwell se apoyó en este resultado para afirmar que la luz es una oem, lo cual aclara que lo que propagan las ondas luminosas es un campo electromagnético oscilante.

Así, en los temas de física clásica se llega hasta ver que la teoría electromagnética pareció que podía acabar con el debate sobre la naturaleza de la luz e imponer el modelo ondulatorio.

Replanteamiento de la naturaleza de la luz en el marco de la física moderna

El tema de cuántica comienza estudiando el efecto fotoeléctrico. El profesor pide a los alumnos que prevean posibles resultados experimentales en este fenómeno y, a continuación, comunica los resultados reales,² que cuestionan que la energía que transporta la luz esté uniformemente distribuida en el espacio y sugieren considerarla concentrada en cuantos de energía sub-microscópicos o fotones. Esta suposición, es decir, **la hipótesis de Einstein-Planck, introduce un nuevo modelo corpuscular para la luz, en el marco de la física moderna.**

Se realizan varias actividades donde se aplica y se pone a prueba el concepto de fotón, prestando especial atención a los espectros atómicos discontinuos, que indican que los electrones del átomo sólo pueden tener determinados valores de energía, como les ocurre, similarmente, a las ondas estacionarias. Entonces se introduce la hipótesis de De Broglie, que atribuye a toda partícula una onda asociada, y se plantea la siguiente actividad.

Actividad 11

Sugerid algún experimento para mostrar un posible comportamiento ondulatorio de haces de partículas.

Los alumnos entienden que se podrían proponer experimentos sobre difracción de partículas, con «rendijas», cuyo tamaño sea del orden de magnitud de su longitud de onda. El profesor puede comentar el experimento pionero de Davidson y Germer, en 1927, que mostró la difracción de electrones, y el posterior de Jönsson, en 1961, que emuló al de la doble rendija de Young, también con electrones (imagen 9).

Llegados aquí, se plantea el concepto de dualidad onda-partícula dejando claro que es una ley general de la física aplicable a todas las entidades (partículas y fotones). También se introduce el principio de complementariedad de Bohr, quien señaló que el observador interactúa con el sistema forzando la prevalencia de uno u otro comportamiento, de tal modo que ningún experimento puede mostrar a una entidad teniendo ambos a la vez.

Estos conceptos están de candente actualidad, y, al hilo de ella, el profesor puede comentar experimentos muy recientes. Citamos uno (Piazza y otros, 2015), en el que, tras siglos de controversia entre el modelo ondulatorio y el corpuscular, se pone el acento en «observar» simultáneamente ambos (fotones diferentes) (imagen 10).

Imagen 9. Resultado del experimento de la doble rendija con electrones. Véase la similitud con la imagen 4 (izquierda).

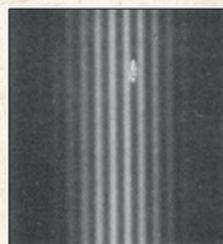
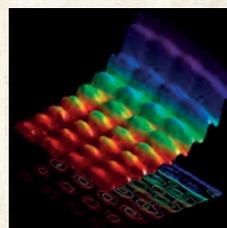


Imagen 10.

«Fotografía» que muestra a la luz comportándose como partícula (arriba) y como onda (abajo)



CONCLUSIONES

El debate histórico sobre la naturaleza de la luz ayuda a estudiar con sentido diversos fenómenos, conceptos y modelos, proporciona oportu-

nidades para reflexionar sobre la construcción del conocimiento científico y contribuye a dar coherencia a temas que podrían resultar dispersos si nos limitáramos a un desarrollo ordinario

por temas aislados. Aquí hemos comentado unas pocas actividades. Invitamos a los lectores interesados a consultar el trabajo entero en nuestra página web. ◀

Notas

1. www.intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Luz/Luz.htm
2. En lugar de comunicar los resultados, una opción interesante es proponer a los alumnos que manipulen un *applet* sobre el efecto fotoeléctrico. Por ejemplo: «The Photoelectric Effect», disponible en: www.kcvs.ca/site/projects/physics.html

Referencias bibliográficas

- GIL, D.; MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1987): «Los programas-guía de actividades: una concreción del modelo constructivista del aprendizaje de las ciencias». *Investigación en la Escuela*, núm. 3, pp. 3-12.
- HUYGENS. C. (1678): *Traité de la lumière*. París. Leyde (publicado en 1690).

NEWTON, I. (1704): *Opticks*. Publ. Inc., 1952.

PIAZZA, L; LUMEN, T; QUIÑONEZ, E. (2015): «Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field». *Nature communications*, núm. 6. Disponible en: <www.iesleonardoalacant.es/Departamento-fisica/Luz/onda-particula.pdf>. [Consulta: mayo de 2016.]

SOLER, V.; OLIVER, J. (2009): «Medida de la intensidad de la luz en las experiencias de interferencia y difracción». *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, núm. 60, pp. 116-121.

Dirección de contacto

Manuel Alonso Sánchez

IES Leonardo da Vinci (Alicante)

manuelalonso@inicia.es

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, en diciembre de 2015 y aceptado en abril de 2016 para su publicación.