

Material Complementario

MIROscopio II

Capítulo 2

Naturaleza dual de la luz

Clase 1 Revisión histórica de los hitos y experimentos que dan origen al modelo de la naturaleza dual de la luz	<ul style="list-style-type: none">• Utilizar video en la introducción de la clase• Dividir en equipos de trabajo al curso para realizar una revisión histórica de los distintos hitos y experimentos a partir de los cuales nacen los modelos ondulatorios y corpuscular de la luz.• Todo el material necesario se entregará a los estudiantes para que puedan generar una ficha detallada del hito o experimento correspondiente.• Estas fichas creadas por los estudiantes se ordenarán en una línea de tiempo para que los estudiantes puedan discutir los acontecimientos bajo la guía del profesor	Tiempo estimado: 2 horas pedagógicas (90 minutos)
Clase 2 Exposición de los hitos y experimentos estudiados la clase anterior	<ul style="list-style-type: none">• En orden cronológico, cada equipo expone al resto de la clase el acontecimiento que le tocó trabajar, y describe si apoya el modelo de onda o de partícula.• Pedirle a cada grupo al final de la exposición que de manera interna (sin exponerla a los compañeros), generen:<ol style="list-style-type: none">1. Una declaración sobre ¿qué es la luz?2. Una pregunta sobre los modelos y/o el comportamiento de la luz	Tiempo estimado: 1 hora pedagógica (45 minutos)
Clase 3 Discusión de las declaraciones y preguntas creadas por los estudiantes	<ul style="list-style-type: none">• El profesor o la profesora guía un debate sobre ¿qué es la luz? entre los estudiantes en base a las distintas declaraciones y consultas generadas por los estudiantes. El profesor o la profesora también puede agregar sus propias declaraciones.• Como actividad de cierre luego de toda la discusión, el profesor o la profesora hará una pequeña clase de cierre donde se mostrará lo que hasta ahora es aceptado científicamente sobre la naturaleza y comportamiento de la luz, para darle un cierre a la pregunta ¿qué es la luz? con una respuesta integral.	Tiempo estimado: 1 hora pedagógica (45 minutos)

PROPUESTA DE CLASES

Clase 1: Revisión histórica de los hitos y experimentos que dan origen al modelo de naturaleza dual de la luz

- Utilizar video en la introducción de la clase.
- Dividir en equipos el curso para realizar una revisión histórica de los distintos hitos y experimentos a partir de los cuales nacen los modelos ondulatorios y corpuscular de la luz.
- Todo el material necesario se entregará a los y las estudiantes para que puedan generar una ficha detallada del hito o experimento correspondiente.
- Estas fichas creadas por los y las estudiantes se ordenarán en una línea de tiempo para que los estudiantes puedan discutir los acontecimientos bajo la guía del profesor o de la profesora.

Clase 2: Exposición de los hitos y experimentos estudiados la clase anterior.

- En orden cronológico, cada grupo expone al resto de la clase el acontecimiento que le tocó trabajar, y describe si apoya el modelo de onda o de partícula.
- Pedirle a cada grupo al final de la exposición que de manera interna (sin exponerla a los compañeros), generen:
 3. Una declaración sobre ¿qué es la luz?
 4. Una pregunta sobre los modelos y/o el comportamiento de la luz.

Clase 3: Discusión de las declaraciones y preguntas creadas por los estudiantes

- El profesor guía un debate sobre ¿qué es la luz? entre los estudiantes en base a las distintas declaraciones y consultas generadas por los estudiantes.
El profesor también puede agregar sus propias declaraciones, aquí algunos ejemplos:

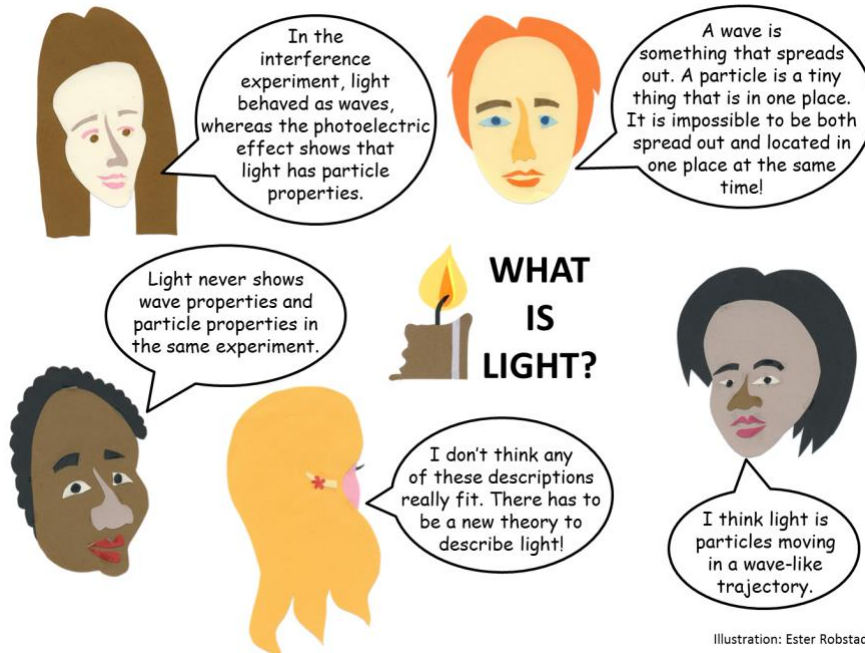


Illustration: Ester Robstad

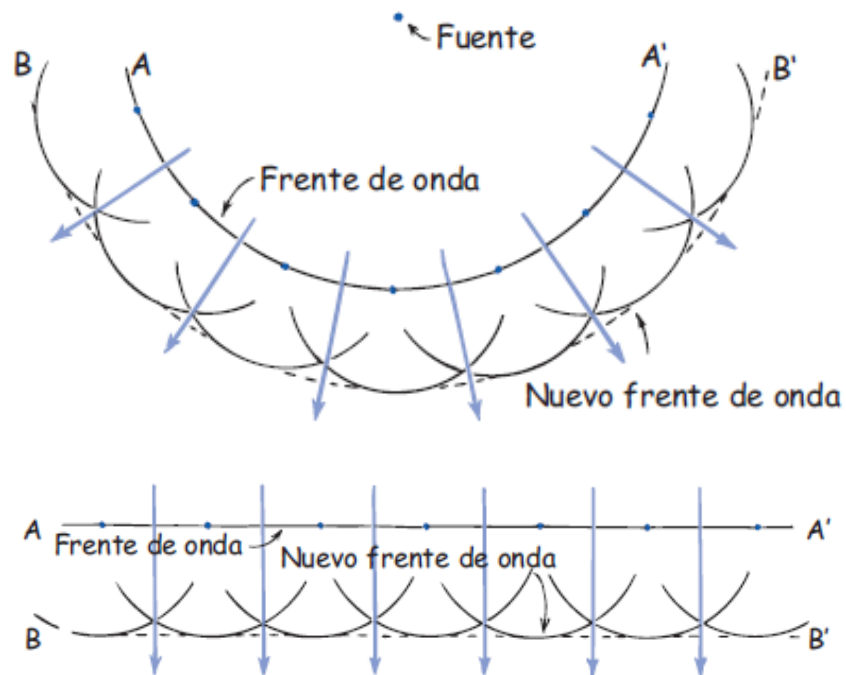
- * En el experimento de interferencia, la luz se comporta como onda, mientras que en el efecto fotoeléctrico la luz muestra propiedades de partícula.
 - * Una onda es algo que se expande en el espacio. Una partícula es una cosa pequeña que está en un punto del espacio. Es imposible que sea ambas, expandida y localizada en un punto al mismo tiempo.
 - * La luz nunca muestra propiedades de onda y de partícula en un mismo experimento.
 - * Creo que ninguna de estas descripciones es completamente correcta. Debe haber una nueva teoría que describa la luz.
 - * Creo que la luz es una partícula moviéndose en una trayectoria ondulatoria.
- Como actividad de cierre luego de toda la discusión, el profesor hará una pequeña clase de cierre donde se mostrará lo que hasta ahora es aceptado científicamente sobre la naturaleza y comportamiento de la luz, para darle un cierre a la pregunta ¿Qué es la luz? Con una respuesta integral.

Material Clase 1: Hitos y Experimentos que dan origen al modelo de naturaleza dual de la luz

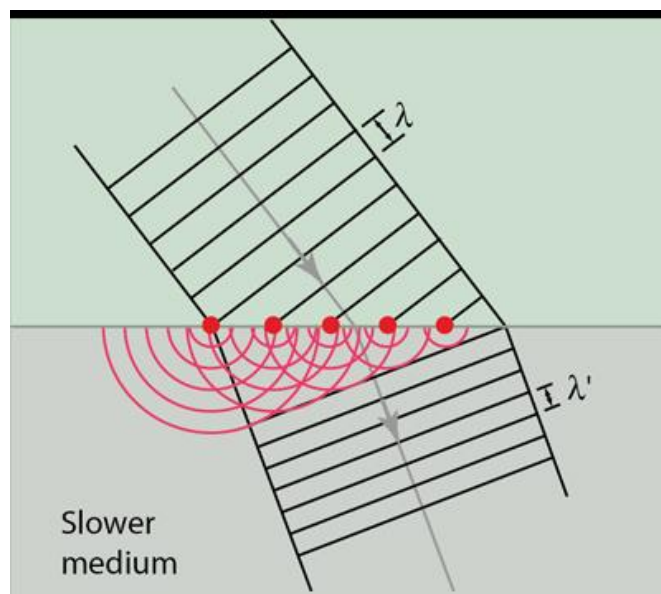
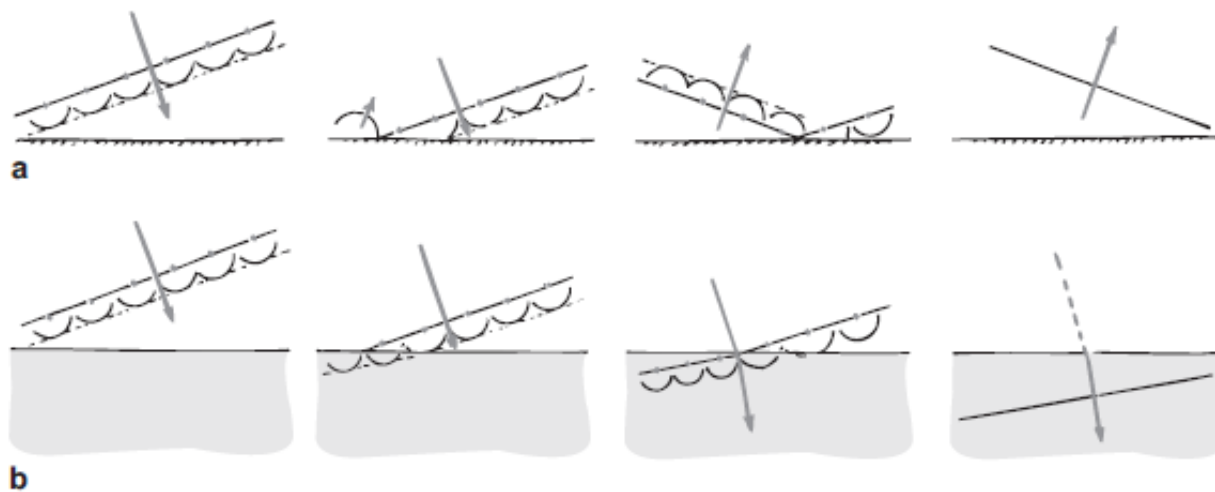
Christian Huygens (1629-1695)

Para Huygens la luz se propaga como onda, ya que su movimiento no es instantáneo, sino que con una velocidad finita. Él afirma esto basado en el conocimiento que existía sobre el sonido: por medio del aire, el sonido se propaga desde su fuente de origen formando superficies esféricas las cuales golpean nuestros oídos. La luz se propaga como lo hace el sonido, necesita tiempo para moverse, y este movimiento es sucesivo a través de la materia.

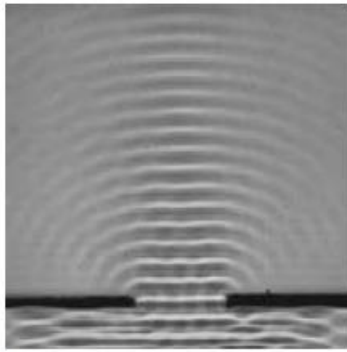
En 1678 Christian Huygens estudió el comportamiento ondulatorio y propuso que los frentes de onda de las ondas de luz que se propagan desde una fuente puntual pueden considerarse como las crestas traslapadas de pequeñas ondas secundarias: los frentes de onda están constituidos de frentes de onda más pequeños. A esta idea se le llama **Principio de Huygens**.



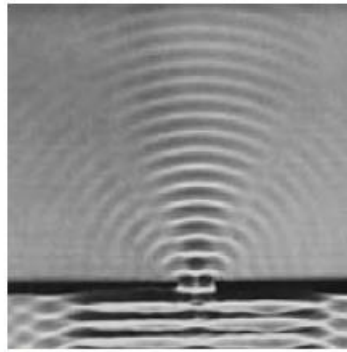
Mediante el principio de Huygens es posible explicar las leyes de la reflexión y la refracción. Tanto en reflexión como en refracción, los puntos de un frente de ondas al llegar al borde sirven como fuentes para la propagación de la luz, en el caso de refracción, hay un cambio de medio y se puede apreciar por qué cambia esa dirección de propagación.



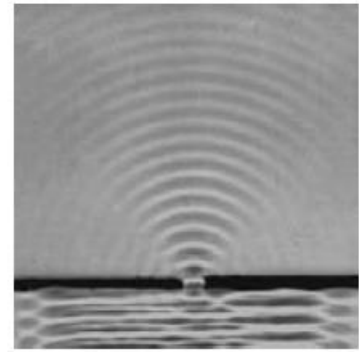
Se pueden generar ondas planas en el agua sumergiendo y sacando una regla horizontal. Cuando la abertura es ancha, se ve que las ondas planas continúan a través de la abertura sin cambiar, excepto en los extremos, donde se desvían hacia la región sombreada, como indica el principio de Huygens. A medida que se hace más angosto el ancho de la abertura se transmite cada vez menos la onda incidente, y se hace más pronunciada la propagación de las ondas hacia la región sombreada. Cuando la abertura es pequeña en comparación con la longitud de la onda incidente se vuelve muy notoria la validez de la idea de Huygens, de que cada parte de un frente de onda se puede considerar como una fuente de nuevas ondas pequeñas. Cuando las ondas inciden en la abertura angosta, se ve con facilidad que el agua que sube y baja en la abertura funciona como una fuente “puntual” de nuevas ondas que se dispersan en el otro lado de la barrera.



a



b



c

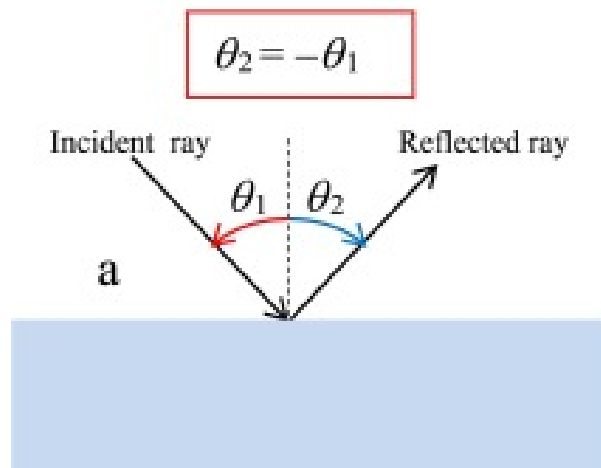
Fuentes:

- Física Conceptual, Paul Hewitt
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/huygen.html>
- Kinematic Optics: A Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth Century, Alan E. Shapiro. Archive for History of Exact Sciences, [Vol. 11, No. 2/3 \(31.XII.1973\)](#), pp. 134-266 (133 pages)

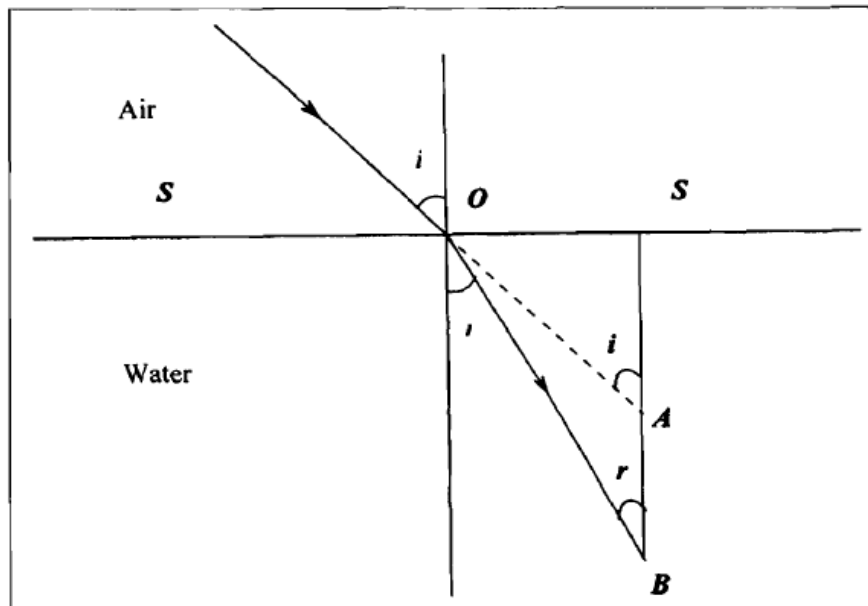
Isaac Newton (1642-1727)

La fama de Newton comenzó con su estudio de la luz. En 1704, Isaac Newton describió la luz como un chorro de partículas para explicar fenómenos como la reflexión, refracción y dispersión cromática, entre otros.

A primera vista, la reflexión es fácilmente explicada con esta teoría. Los corpúsculos de luz incidiendo sobre la superficie se reflejan, como una pelota sobre una superficie rígida, satisfaciendo la ley de reflexión.



En cuanto a refracción, el modelo corpuscular predice que la velocidad de la luz debiera ser mayor en medios ópticos densos que en el aire. Un corpúsculo de luz viajando en el aire e incidiendo en una interface aire-agua, por ejemplo, es atraída por las moléculas de agua.

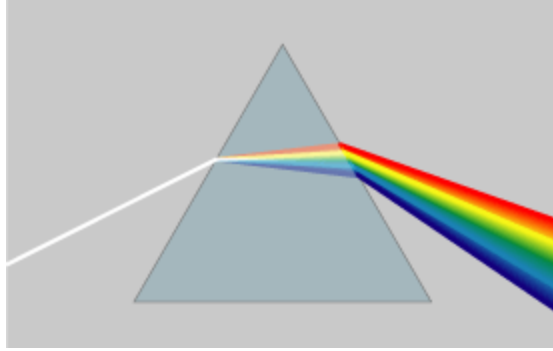


Se observa un cambio de dirección en el agua lo que implica que hay un cambio en la velocidad tal que

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{OB}{OA} = \frac{v_{water}}{v_{air}} = n$$

Como experimentalmente n es mayor que 1 tenemos que la velocidad en el agua (v_{water}) es mayor que la velocidad en el aire (v_{air}). Newton explicó cómo este resultado puede surgir en un modelo óptico mecánico de refracción. Él postuló una fuerza intensa de corto alcance entre los corpúsculos de luz y los corpúsculos del cuerpo. En la pequeña región donde la fuerza actúa en una dirección perpendicular a la superficie, los corpúsculos de luz “caen”, de la forma que las partículas caen bajo el efecto de la gravedad, lo que los atrae hacia la normal de la superficie.

Newton observó la dispersión cromática provocada por un prisma y se dio cuenta que la luz roja se refracta menos y la luz violeta más. Él afirmó que la masa de los corpúsculos de luz varía con el color. Los corpúsculos de luz roja tienen menos masa que los de luz violeta, por esta razón se desvían menos al cruzar una interfaz. Newton asumió que todos los corpúsculos experimentan la misma fuerza al cruzar la interfaz y que lo que difiere es entonces la inercia que experimenta la luz de cada color. En conclusión, los corpúsculos de luz roja con más inercia se desvían menos con la misma fuerza que los de luz violeta.



Fuentes:

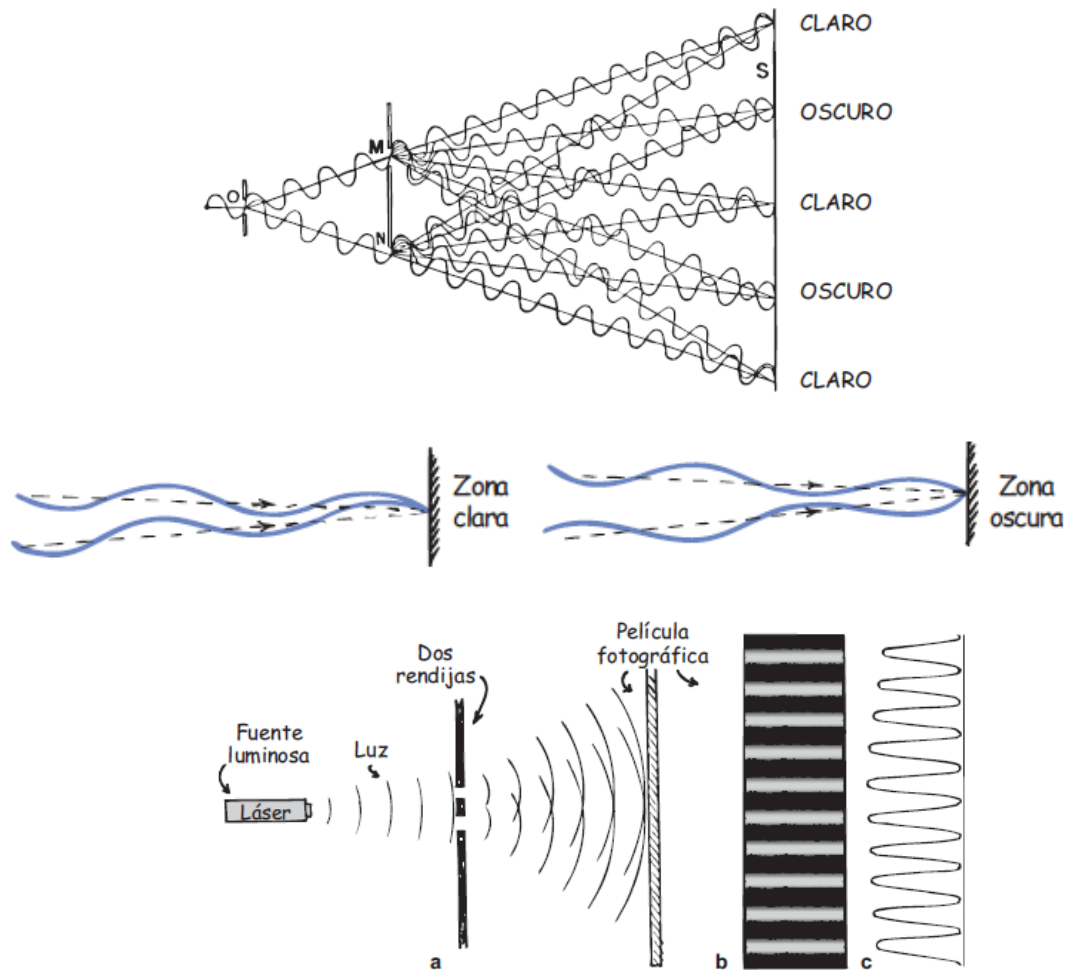
- <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/011/12/0010-0020>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517301032?via%3Dihub>
- <http://galileo.phys.virginia.edu/classes/609.ral5q.fall04/LecturePDF/L20-LIGHTII.pdf>

Thomas Young (1773-1829)

En 1801, la naturaleza ondulatoria de la luz se demostró de un modo convincente cuando Thomas Young realizó su ahora famoso experimento de interferencia, “el experimento de la doble rendija”.

Al realizar este experimento supón que cubres una de las rendijas de modo que la luz pase sólo por una rendija. Entonces la luz formará un abanico e iluminará la pantalla para formar un patrón de difracción simple. Si cubres la otra rendija y dejas pasar luz sólo por la rendija recién descubierta, obtienes la misma iluminación sobre la pantalla, pero desplazada. Si no tuvieras el conocimiento, esperarías que con ambas rendijas abiertas el patrón simplemente fuera la suma de los patrones de difracción de cada rendija. Pero esto no sucede. Más bien, el patrón formado es uno de bandas de luz y oscuridad. Se tiene un patrón de interferencia.

Young descubrió que la luz dirigida a través de dos rendijas cercanas entre sí se recombina y produce franjas de brillo y oscuridad sobre una pantalla frente a ellas. Las franjas brillantes se forman cuando una cresta de la onda luminosa que pasa por una rendija y una cresta de la onda luminosa que pasa por la otra rendija llegan a la pantalla al mismo tiempo. Las franjas oscuras se forman cuando una cresta de una onda y un valle de la otra llegan al mismo tiempo.



Fuentes:

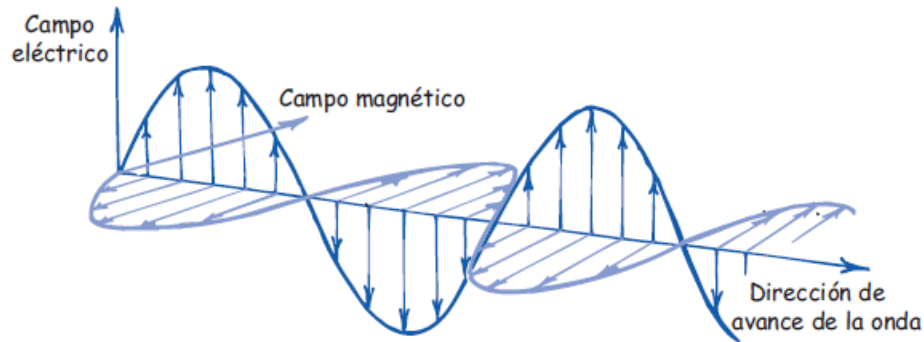
- Física Conceptual, Paul Hewitt

James Maxwell (1831-1879)

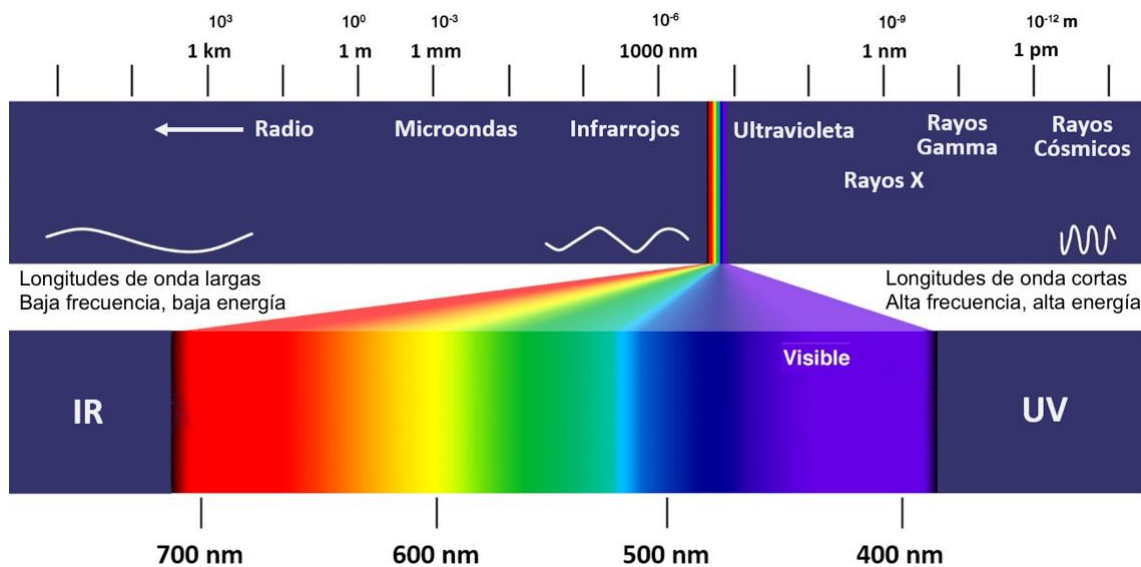
Desarrolló la teoría electromagnética, que sintetiza en una teoría consistente todas las observaciones, experimentos y ecuaciones de electricidad, magnetismo e incluso óptica que antes no guardaban ninguna relación.

A partir de sus ecuaciones de inducción electromagnética, Maxwell calculó el valor de la rapidez de las ondas electromagnéticas y descubrió que era 300.000 km/s. Él concluyó: “esta velocidad es tan cercana a la velocidad de la luz que tenemos una buena razón para concluir que la luz es una perturbación electromagnética en la forma de ondas propagándose a través de un campo electromagnético de acuerdo con las leyes del electromagnetismo.”

Maxwell se dio cuenta que había descubierto la naturaleza de la luz. La luz es una onda electromagnética, es decir, campos eléctricos y magnéticos vibrando en armonía, perpendiculares a la dirección de propagación.



En el vacío, las ondas electromagnéticas se mueven a la misma rapidez, y difieren entre sí por la frecuencia. La clasificación de las ondas electromagnéticas por su frecuencia es el espectro electromagnético. Las frecuencias que observamos con nuestros ojos es lo que se conoce como luz visible, que forma menos de la millonésima parte del 1% del espectro electromagnético medido. La luz de frecuencia mínima y mayor longitud de onda que podemos ver es roja y la de frecuencia máxima y menor longitud de onda es violeta.



Fuentes:

- Física Conceptual, Paul Hewitt
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517301032?via%3Dihub>

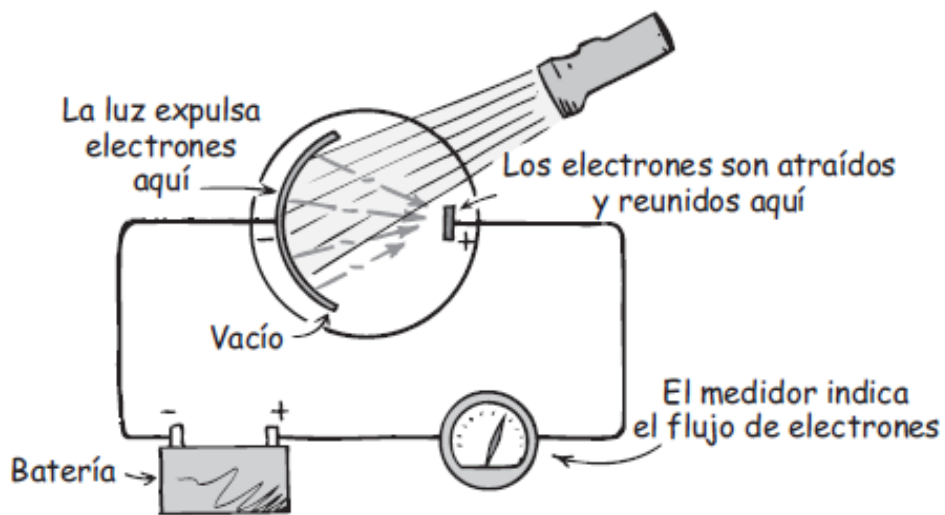
Albert Einstein (1879-1955)

En 1905 Einstein propuso no sólo que la energía se agrega a la luz en unidades cuánticas, sino también que la propia luz existe como bultos cuánticos, o “corpúsculos”, más tarde llamados fotones.

A finales del siglo XIX, algunos investigadores notaron que la luz es capaz de expulsar electrones de diversas superficies metálicas. Esto es lo que hoy se conoce como el efecto fotoeléctrico. Los primeros investigadores no pudieron explicar este efecto con física clásica imaginando que las ondas de la luz incidente acumulan la vibración de un electrón en amplitudes cada vez mayores, hasta que al final se suelta de la superficie del metal. Una fuente luminosa débil debería tardar mucho en dar a los electrones de la superficie metálica la energía suficiente para desprenderse de la superficie. Sin embargo, se encontró que los electrones son expulsados tan pronto como se enciende la luz, pero que no se desprenden muchos más como con una fuente de luz intensa. Era especialmente difícil entender la carencia de un retraso apreciable, en términos de la idea ondulatoria. Según la teoría ondulatoria, un electrón en luz débil debería, después de cierto retraso, acumular la energía vibratoria suficiente como para salir despedido; mientras que uno en luz brillante se debería expulsar casi de inmediato. Sin embargo, eso no sucedió. No fue raro observar que un electrón se expulsaba de inmediato, aún bajo la iluminación más tenue. También causaba perplejidad la observación de que el brillo de la luz no afectaba las energías de los electrones expulsados. Los campos eléctricos más intensos de la luz más brillante no hacían que los electrones salieran despedidos a mayores rapidezces. Con luz brillante se expulsaban más electrones, pero no a mayores rapidezces. Por otro lado, un débil rayo de luz ultravioleta producía una pequeña cantidad de electrones expulsados, pero que tenían rapidezces mucho mayores. Esto era de lo más confuso.

Einstein llegó a la respuesta en 1905, siguiendo el indicio de la teoría cuántica de la radiación de Planck. Einstein atribuyó propiedades cuánticas a la luz misma, y consideró que la radiación es una granizada de partículas. Para enfatizar este aspecto corpuscular, siempre que imaginamos la naturaleza corpuscular de la luz, hablamos de fotones. Un fotón se absorbe por completo en cada electrón expulsado del metal. La absorción es un proceso de todo o nada, y es inmediato; no hay demora mientras se acumulan las “energías ondulatorias”. Una onda luminosa tiene un frente amplio, y su energía está repartida en ese frente. Para que la onda luminosa expulse un solo electrón de una superficie metálica, toda su energía debería concentrarse en ese electrón. Pero eso es tan improbable como el caso de que una ola del mar lance una piedra hacia el continente, muy lejos, con una energía igual a toda la energía de la ola. Por lo tanto, en vez de imaginar que la luz encuentra una superficie en forma de un tren de ondas continuo, el efecto fotoeléctrico sugiere concebir la luz que encuentra la superficie de cualquier detector como una sucesión de corpúsculos, o fotones. La cantidad de fotones en un rayo de luz controla el brillo de todo el rayo; en tanto que la frecuencia de la luz controla la energía de cada fotón individual.

El efecto fotoeléctrico es prueba concluyente de que la luz tiene propiedades de partículas. No podemos concebir el efecto fotoeléctrico con bases ondulatorias.



Fuentes:

- Física Conceptual, Paul Hewitt

El fotón

Regresemos al experimento de Thomas Young de la doble rendija. Recuerda que al pasar luz monocromática por un par de rendijas delgadas cercanas, se produce un patrón de interferencia. Ahora examinemos el experimento en términos de fotones. Supongamos que debilitamos la fuente luminosa, de tal modo que sólo llegue un fotón tras otro a la barrera de las rendijas angostas. Si la película detrás de la barrera se expone a la luz, durante un tiempo muy corto, la película se expone cómo se simula en la figura 31.6a. Cada mancha representa el lugar donde un fotón expuso la película. Si se deja que la luz expusiera la película durante más tiempo, comenzaría a formarse un patrón de franjas, como en la figura 31.6b y 31.6c. ¡Esto es muy sorprendente! Se ve que las manchas en la película avanzan fotón por fotón, y forman ¡el mismo patrón de interferencia que caracteriza las ondas!

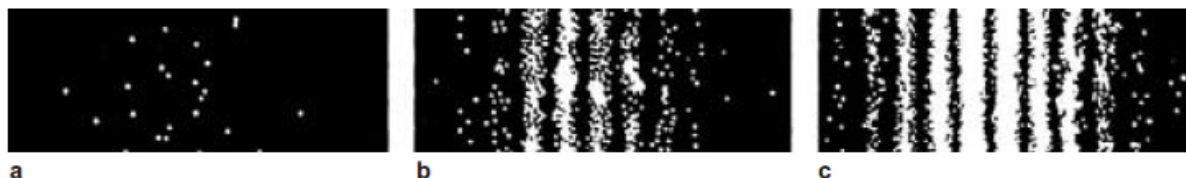


FIGURA 31.6 [Figura interactiva](#)

Patrón de interferencia de doble rendija. El patrón de los granos expuestos individualmente progresa desde a) 28 fotones, hacia b) 1,000 fotones, y hasta c) 10,000 fotones. Conforme más fotones choquen contra la pantalla, aparece un patrón de franjas de interferencia.

Si cubrimos una de las rendijas, para que los fotones que llegan a la película fotográfica sólo puedan pasar por la otra, las manchas diminutas en la película se acumulan y forman un patrón de

difracción de una sola rendija (figura 31.7). Se ve que los fotones llegan a la película ¡en lugares donde no llegarían si ambas rendijas estuvieran abiertas!



FIGURA 31.7
Patrón de difracción con una sola rendija.

Si consideramos todo esto desde el punto de vista clásico, quedamos perplejos y preguntaremos cómo “saben” los fotones que pasan por una sola rendija, que la otra rendija está cubierta y, por lo tanto, se reparten y producen el patrón ancho de difracción de una sola rendija. O bien, si las dos rendijas están abiertas, ¿cómo “saben” los fotones que pasan por una rendija, que la otra está abierta y evitan llegar a ciertas regiones, llegando sólo hasta zonas que acabarán por llenarse y formar el patrón de franjas de interferencia con dos rendijas? La respuesta actual es que la naturaleza ondulatoria de la luz no es una propiedad promedio que sólo se muestra cuando actúan juntos muchos fotones. Cada fotón tiene propiedades tanto de onda como de partícula. Pero el fotón muestra distintos aspectos en distintas ocasiones. Un fotón se comporta como una partícula cuando se emite de un átomo, o se absorbe en una película fotográfica o en otros detectores; y se comporta como una onda al propagarse desde una fuente hasta el lugar donde se detecta. Así, el fotón llega a la película como una partícula, pero viaja hasta su posición como una onda con interferencia constructiva. El hecho de que la luz tenga comportamiento de onda y de partícula a la vez fue una de las sorpresas más interesantes de principios del siglo XX.

Fuente:

- Física Conceptual, Paul Hewitt

Créditos

Este material se realizó basado en la propuesta de la profesora Cynthia Moreno y en el material del proyecto ReleQuant <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/relequant/>

Referencias Bibliográficas

Henriksen, E. K., Angell, C., Vistnes, A. I. & Bungum, B. (2018). What Is Light? Students' Reflections on the Wave-Particle Duality of Light and the Nature of Physics. *Science & Education*, 27, 81-111.

Hewitt, P. G. (2007). *Física Conceptual* (10a. ed.). PEARSON EDUCACIÓN.

Nota Final

Si posees alguna crítica constructiva para este material, o construiste una adaptación de este, o hiciste las actividades sugeridas en tu casa o en tu sala de clases y nos quieres contar tu experiencia, no dudes en escribirnos y te invitamos a compartir tu experiencia en redes sociales etiquetándonos como @Instituto Milenio MIRO.