

extremadamente improbables. Si no fuese así, se podría ionizar los átomos de hidrógeno con radiación de una frecuencia menor a la que se mide experimentalmente.

Aplicando el modelo cuántico de radiación basado en el concepto de fotón para interpretar los espectros de absorción, también evidenciamos que un átomo no puede absorber dos o más fotones y “sumar” su energía para hacer una transición. Así mismo, al analizar la emisión no se ha considerado la posibilidad de que un átomo emita dos fotones al realizar una única transición entre estados estacionarios. A cada transición energética le corresponde la emisión o absorción de una única frecuencia. Este resultado evidencia, en la interpretación de los espectros, la relación entre frecuencia de la radiación y cantidad de energía emitida o absorbida que conecta con el concepto de fotón.

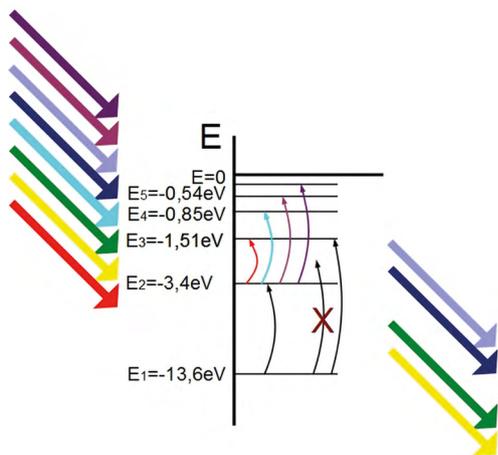


Fig. 6. La formación del espectro de absorción del hidrógeno se debe a que los átomos del gas absorben únicamente las radiaciones que conllevan transiciones entre estados estacionarios. Para que esto ocurra, se necesita que los átomos de hidrógeno se encuentren inicialmente en el segundo estado estacionario, lo que se puede lograr aportando calor. La transición tachada con una X no es posible, puesto que no tiene lugar entre estados estacionarios.

Conclusiones y perspectivas

El modelo establecido se puede emplear para explicar el funcionamiento de las fuentes de radiación que hemos nombrado con anterioridad al estudio en profundidad del espectro del hidrógeno. A pesar de todas sus aplicaciones, la introducción del modelo cuántico de emisión y absorción de radiación no está carente de problemas. Por un lado, supone la aceptación de un modelo corpuscular para la radiación incompatible con el modelo ondulatorio, imprescindible para explicar fenómenos como la interferencia (¡que da cuenta del funcionamiento del mismo espectroscopio!) o para dar sentido a conceptos como frecuencia o longitud de onda de la radiación. Por otro lado, todas las explicaciones que hemos dado de los procesos de emisión y absorción han sido explicaciones *a posteriori*, es decir, establecemos una estructura de niveles energéticos para el hidrógeno que da cuenta de la radiación que emite, pero no disponemos de ningún principio físico que nos permita determinar dicha estructura de niveles y ponerla a prueba mediante el análisis espectral. Por último, incorpora la idea de aleatoriedad intrínseca. Se requiere el establecimiento de una nueva física, que históricamente tuvo lugar a partir de 1925, para superar estas dificultades y recuperar la coherencia en la física.

Referencias

- [1] S. B. MCKAGAN, K. K. PERKINS, M. DUBSON, C. MALLEY, S. REID, R. LEMASTER, y C. E. WIEMAN, Developing and Researching PhET Simulations for Teaching Quantum Mechanics, *American Journal of Physics* **76** (4), 406 (2008).
- [2] F. SAVALL, J. GUIASOLA, S. ROSA y J. MARTÍNEZ-TORREGROSA, Problem-based Structure for a Teaching-Learning Sequence to Overcome Students' Difficulties when Learning About atomic Spectra, *Physical Review Physics Education Research* **15**, 020138 (2019).
- [3] F. SAVALL, I. CUESTA, N. PEIRÓ, P. ROCHER y A. TOMÁS, Contrucció i ús d'un espectroscopi per a Smartphones (2019). <https://www.uv.es/uvweb/experimenta/ca/novetats/projectes-premiats-2019-explicats-protagonistes-1285927554800/Novetat.html?id=1286094586230>.
- [4] N. BOHR, On the constitution of atoms and molecules, *Philosophical Magazine* **26**, 1 (1913).
- [5] N. BOHR, On the constitution of atoms and molecules. Part II. Systems containing only a single nucleus, *Philosophical Magazine* **26**, 476 (1913).
- [6] A. EINSTEIN (1917), Sobre a teoria quàntica da radiação, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27** (1), 93 (2005).
- [7] N. BOHR, *Física atómica y conocimiento humano* (Aguilar, 1964).
- [8] M. JAMMER, *The conceptual development of quantum mechanics* (McGrawHill, 1966).

Descripción de la luz en Bachillerato: modelo ondulatorio clásico, modelo fotónico y teoría cuántica

Pedro González Marhuenda
Dpto. de Física Teórica, Universidad de Valencia (UV),
e Instituto de Física Corpuscular IFIC (UV-CSIC)



Manuel Alonso Sánchez
Sección Local de Alicante de la RSEF



En este artículo, tras repasar los principales aspectos del modelo ondulatorio clásico de la luz que se estudian en Bachillerato, desarrollamos el modelo fotónico, mostrando que su aplicación no tiene por qué limitarse al estudio de hechos no explicables con el modelo ondulatorio clásico, sino que se puede extender a la descripción microscópica del comportamiento de la luz en muchos procesos. En este desarrollo también ponemos en evidencia las limitaciones del modelo, haciendo patente la necesidad de su imple-

mentación hacia la teoría cuántica de la luz, de la que proponemos hacer en clase una breve introducción.

1. Introducción

Con respecto a las tres descripciones de la luz a las que alude el título de este artículo, los estudiantes de Bachillerato:

- i) Conocen bastantes aspectos del modelo ondulatorio clásico. En los temas de óptica y de electromagnetismo constatan que explica un gran número de comportamientos de la luz.
- ii) Conocen alguna aplicación del modelo fotónico basado en la hipótesis de que la luz está constituida por partículas, denominadas fotones, que interactúan con la materia pudiendo ser absorbidas o emitidas por esta. En el tema de introducción a la física cuántica constatan que el concepto de fotón permite explicar algunos comportamientos de la luz incompatibles con el modelo ondulatorio clásico en procesos tales como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y los espectros atómicos.
- iii) Desconocen la teoría cuántica de la luz.

Tras repasar algunos aspectos del modelo ondulatorio clásico, dedicaremos la parte principal de este artículo a extender la aplicación del modelo fotónico y a constatar la necesidad de implementar el modelo hacia la teoría cuántica. Nuestra intención es contribuir a que los estudiantes:

- a) Apliquen el modelo fotónico a otros procesos en los que interviene la luz, más allá de los citados anteriormente.
- b) Tengan conocimiento de algún experimento con luz muy débil, para tomar conciencia de que los fotones no se comportan como corpúsculos clásicos.
- c) Conozcan, de manera muy embrionaria, algunos detalles de la teoría cuántica, aprendiendo que es la única capaz de explicar todos los comportamientos de la luz.
- d) Ubiquen el modelo ondulatorio clásico como un caso límite de la teoría cuántica de la luz.

2. Modelo ondulatorio clásico

En este apartado comentamos acerca del tratamiento que puede hacerse de diversos aspectos del comportamiento de la luz en los temas de óptica y electromagnetismo, en los que se consolida a los ojos de los alumnos el modelo ondulatorio clásico.

Emisión primaria de luz

Una manera de iniciar el tema de Óptica es pedir en clase que se consideren algunas fuentes de luz propia (bombilla tradicional, cerilla, estrella) intentando explicar qué ocurre en ellas. Los estudiantes se dan cuenta de que tiene lugar un proceso físico, químico, nuclear, etc., que propicia la emisión. Como personas situadas en diferentes lugares pueden ver las fuentes, también llegan a la conclusión de que dicha emisión de luz ocurre en todas las direcciones.

Fuentes secundarias de luz

Para introducir este concepto se puede plantear una pregunta del tipo: ¿Por qué vemos un tomate de color rojo al iluminarlo con luz blanca? Se explica que el tomate absorbe la luz blanca que incide sobre él y luego emite nueva luz, cuya frecuencia dominante corresponde al color rojo. Se aclara también que lo que interpreta nuestro cerebro, a partir de la

luz recibida desde cada punto de un objeto, es la imagen del mismo (figura 1).

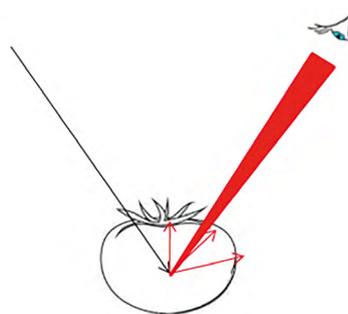


Fig. 1. Esquema para explicar el concepto de fuente secundaria de luz (aplicado a la visión de un tomate).

Invisibilidad de la luz

Formulando la pregunta de si nosotros vemos la luz, es decir, si vemos las ondas luminosas, es fácil que los alumnos se den cuenta de que incluso la "luz visible" es realmente invisible para nuestros ojos. Para que se asuma completamente este hecho, conviene aclarar por qué en ocasiones parece que vemos "rayos luminosos". Para ello, se puede realizar una experiencia en la que la luz emitida por un puntero láser pasa primero a través de agua y después a través de agua con unas gotas de leche (figura 2).

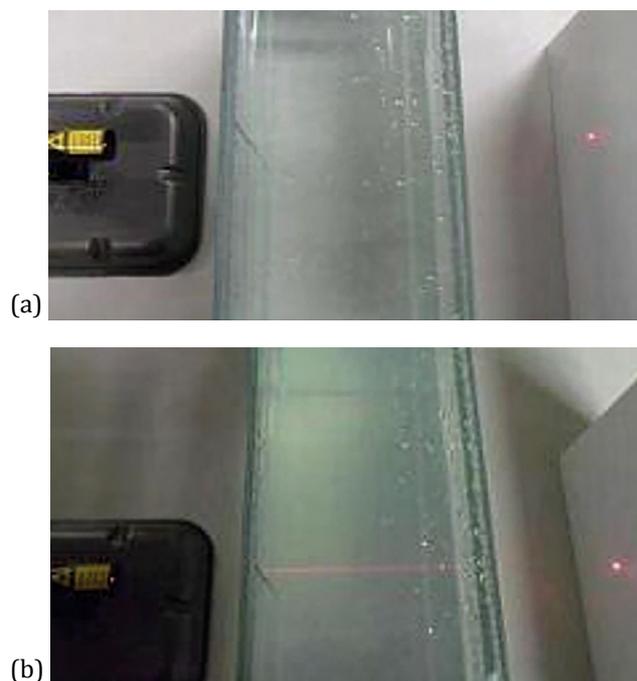


Fig. 2. (a): El rayo de luz láser es invisible en el agua. (b): El mismo rayo sí es "visible" dentro del agua después de haber disuelto unas pocas gotas de leche (experiencia realizada por alumnos del IES Leonardo da Vinci de Alicante).

Los estudiantes comprenden que lo que vemos (figura 2(b)) son las imágenes de gotas de leche disueltas en el agua, que absorben la luz y la emiten en todas las direcciones.

Esta experiencia, al poner en evidencia que la luz láser puede o no ser absorbida dependiendo del medio, ayuda también a plantear los conceptos de **opacidad y transparencia**, ilustrados con algún ejemplo como el vidrio, bastante transparente a la luz visible y bastante opaco a la ultravioleta

(Feynman lo sabía y prescindió de gafas protectoras dentro de un camión para ver una prueba de la bomba atómica).

Principio de Huygens. Aplicación a la reflexión, refracción, difracción e interferencias

El principio de Huygens, que establece que cualquier punto del medio al que llega una onda luminosa se convierte en un foco emisor de nuevas ondas, se aplica en el tema de Óptica a bastantes comportamientos de la luz, construyendo diagramas gráficos basados en él, por ejemplo, en la reflexión y en la refracción (figura 3).

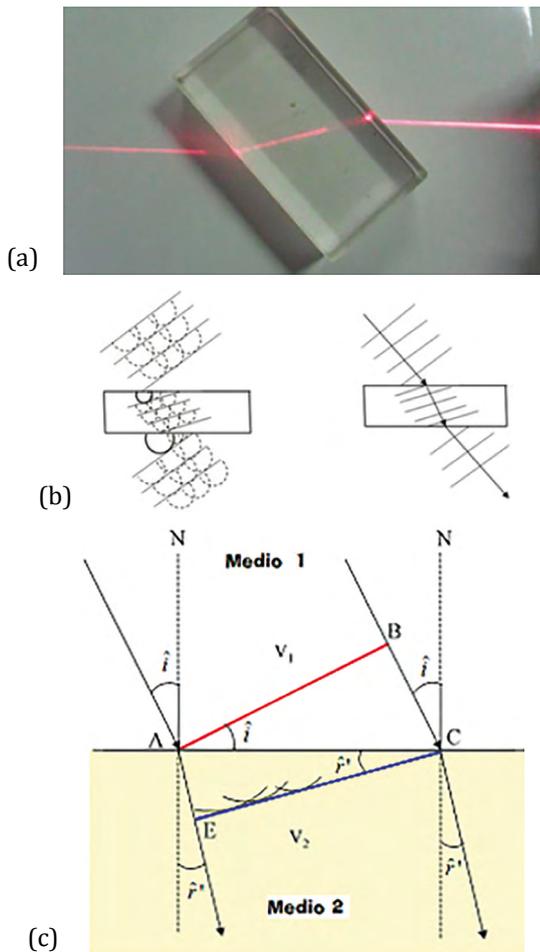


Fig. 3. Refracción de la luz y principio de Huygens. (a): Fotografía de la doble refracción aire-vidrio-aire (tomada por alumnos del IES Leonardo da Vinci de Alicante) (b): Diagramas interpretativos del proceso usando el principio de Huygens (cualitativo). (c): Diagrama (cuantitativo) para obtener la ley de Snell.

El principio de Huygens también se aplica a la difracción y a las interferencias luminosas, resaltando cómo a partir del siglo XIX estos dos procesos contribuyeron al impulso definitivo del modelo ondulatorio. Se destaca la gran aportación de Young con el experimento de la doble rendija, pudiendo los alumnos reproducir el experimento o uno similar utilizando una red de difracción (figura 4).

También se menciona la teoría ondulatoria de la difracción que Fresnel presentó para optar al premio de la Academia Francesa de Ciencias de París en 1819. Poisson, que era un detractor del modelo ondulatorio de la luz, intentó refutar la teoría de Fresnel usando las ecuaciones presentadas por este para mostrar que de ellas se derivaba un resultado “absurdo”, contrario a la intuición: la sombra de un disco circular opaco

tendría en su centro un punto brillante. Pero el intento fue en vano, pues Arago verificó experimentalmente el resultado y Fresnel ganó el premio y fue nombrado años después miembro de la Academia.

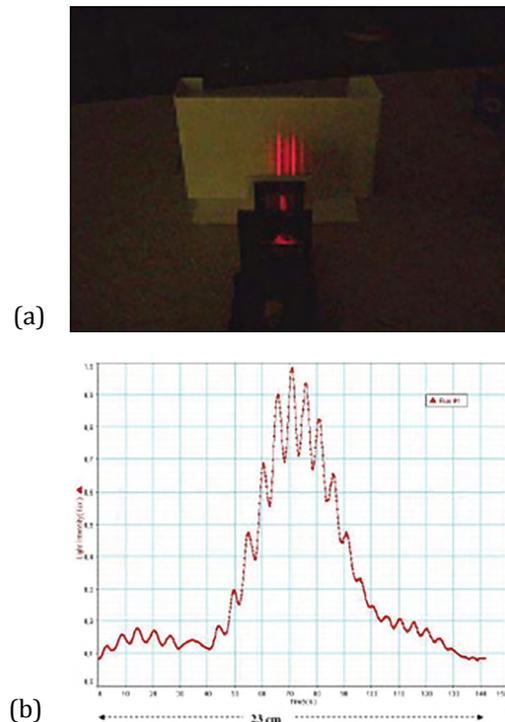


Fig. 4. (a): Franjas de interferencia producidas después de que un rayo de luz monocromática emitido por un puntero láser atraviesa una red de difracción (experimento realizado por alumnos del IES Leonardo da Vinci de Alicante). (b): Gráfica de la distribución de intensidad obtenida con un sensor de luz (experimento realizado por alumnos del IES Sixto Marco de Elche).

Color

No es tan habitual, pero también vale la pena mostrar en Bachillerato cómo Young usó su modelo ondulatorio para interpretar el color. Empezó cuestionando el modelo newtoniano, según el cual la luz sería una granizada de corpúsculos portadores de los colores (se necesitaría un número enorme de ellos diferentes y en nuestros ojos deberíamos poseer también un número enorme de receptores distintos); luego atribuyó el color a la longitud de onda¹, y afirmó: “Cuando varios colores viajan juntos se perciben como una onda luminosa de un solo color resultante de la composición de las diferentes longitudes de onda” [1]. Además, comprobó empíricamente que todos los colores se pueden obtener combinando luces de tres colores básicos (verde, rojo y azul intenso).

Velocidad de la luz en diferentes medios

En el tema de electromagnetismo se explica que la luz es una onda electromagnética y se interpreta el valor de la velocidad de la luz en el vacío, c , como el cociente $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$, donde μ_0 y ϵ_0 son respectivamente la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica del vacío. Los estudiantes entienden que en otros medios la interacción con el campo electromagnético es distinta y la velocidad de la luz es menor que c .

1 El color realmente está determinado por la frecuencia ν , pero en un medio dado a cada color le corresponde una longitud de onda $\lambda = \nu/\nu$, donde ν es la velocidad de la luz en el medio.

Polarización

La polarización fue clave para establecer la transversalidad de las ondas electromagnéticas. Además de destacar esto en clase, pueden mencionarse los trabajos de Malus, pionero en señalar que era un fenómeno inherente a la propia luz. También cabe hacer algunas experiencias (birrefringencia), y considerar aplicaciones tecnológicas (gafas, polariscopios).

Resumen y crítica

Con todo lo anterior los estudiantes de Bachillerato obtienen un conocimiento amplio de la descripción de la luz mediante el modelo ondulatorio clásico. Pero, enseguida (en el tema de “introducción a la física cuántica”), conocen el fracaso de este modelo para explicar algunos procesos que requieren la consideración de interacciones a nivel microscópico entre luz y materia. Los estudiantes han de saber entonces que el modelo ondulatorio clásico no puede explicarlos porque es incompatible con el carácter discreto de la energía en la luz. Y que, por tanto, aunque de forma global explica exitosamente muchos procesos, no puede dar cuenta de lo que ocurre en ellos a escala microscópica.

3. Modelo fotónico

La introducción del cuanto de energía luminosa por Planck (para luz de frecuencia ν este cuanto está dado por $h\nu$, siendo h la constante de Planck) para explicar el intercambio de energía entre la luz y la materia, y la hipótesis de Einstein de que la propia luz está constituida por cuantos, posteriormente llamados fotones, junto con conocimientos básicos de relatividad especial estudiados antes, son herramientas suficientes para plantear en Bachillerato un modelo de la luz en términos de fotones. Los estudiantes asumen con naturalidad que los fotones, al no tener masa, han de viajar en el vacío a la velocidad c .

Mostraremos que la aplicación de dicho modelo no tiene por qué limitarse al estudio de procesos no explicables con el modelo ondulatorio clásico, sino que, combinado con el conocimiento del carácter discreto de la energía de los electrones en la materia (niveles de energía electrónicos) y con la condición de que exista un número máximo de electrones por nivel (ocupación máxima), permite describir cualitativamente a escala microscópica el comportamiento de la luz en otros muchos procesos. Veremos también que los experimentos fotón a fotón muestran que los fotones no se comportan como corpúsculos clásicos, haciendo patente la necesidad de una teoría puramente cuántica de la luz.

Absorción y emisión de luz

Un primer proceso a describir con el modelo fotónico es la absorción de luz por la materia. Cuando fotones de la luz incidente tienen una energía aproximadamente igual a la diferencia de energía entre dos niveles electrónicos de la materia y el nivel superior no tiene ocupación máxima, puede producirse la absorción de fotones acompañada de saltos de electrones desde el nivel inferior al superior. Este proceso se denomina **absorción estimulada** (figura 5).

Tras un proceso de absorción, la materia queda en un estado excitado, que es inestable, y tiende a volver a su estado no excitado mediante una o varias transiciones (caídas) electrónicas. Este proceso se denomina **emisión espontánea** y tiene lugar en todas direcciones (figura 6).

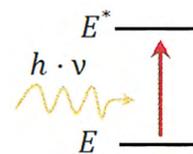


Fig. 5. Esquema elemental del proceso de absorción estimulada. Un fotón con energía $h\nu$, igual a la diferencia de energía entre dos niveles, $h\nu = E^* - E$, es absorbido y da lugar a un salto electrónico desde el nivel de energía E hasta el nivel de energía E^* .

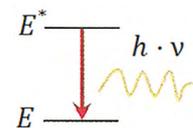


Fig. 6. Esquema elemental del proceso de emisión espontánea de un fotón. En una caída electrónica desde el nivel de energía E^* al nivel de energía E se emite un fotón con energía $h \cdot \nu = E^* - E$.

Estos procesos explican el hecho de que una fuente luminosa presente unas frecuencias de emisión características y distintivas (en el espectro visible cada frecuencia corresponde a un color), ya que emite luz con frecuencias acordes a los niveles de energía electrónicos del material que la compone. Hay fuentes con espectros discretos (como el mercurio gaseoso en el experimento de Franck-Hertz) provenientes de transiciones entre niveles discretos, y también otras con espectros de emisión casi continuos o continuos (como el filamento de tungsteno de una bombilla incandescente) provenientes de transiciones entre niveles de energía muy próximos entre sí o formando un continuo.

Por otra parte, cuando en un material hay niveles de energía intermedios entre E^* y E , sin ocupación máxima, la vuelta al estado no excitado puede tener lugar mediante una sucesión de caídas electrónicas, de manera que las energías de los fotones emitidos sean distintas de $h \cdot \nu$. Por ejemplo, hay materiales denominados fluorescentes que pueden absorber luz ultravioleta y emitir parte de la energía absorbida como luz visible. Un material de este tipo se utiliza en los tubos fluorescentes.

El hecho de que en esta descripción de la absorción-emisión de luz la energía de los fotones ha de corresponder a la de transiciones electrónicas en la materia, permite explicar la **transparencia** de un material en un determinado rango de frecuencias, que ocurre cuando la energía de los fotones es significativamente diferente a la de cualquier posible salto energético en ese material. También explica que no podamos ver, como comentamos anteriormente, un haz de luz láser propagándose en agua, y sí en cambio cuando en ella se han disuelto gotas de leche, porque estas pueden absorber fotones con energía correspondiente a la frecuencia de la luz láser, y emitir nuevos fotones de la misma energía en todas las direcciones, incluidas las que apuntan a nuestros ojos.

Cabe añadir por completitud que, aparte de su posible absorción, un fotón con energía igual a la diferencia de energía entre dos niveles energéticos del material, $E^* - E$, puede no ser absorbido y hacer más probable la caída electrónica entre los niveles de energía E^* y E , con emisión de un fotón de la misma energía $E^* - E$, siempre que el número de electrones en esos niveles permita que se pueda producir dicha caída. Este proceso se denomina **emisión estimulada** y subyace en la emisión de luz láser.

Reinterpretación del principio de Huygens

Los dos procesos considerados, absorción por la materia de fotones de la luz incidente y emisión posterior de fotones de la luz saliente, se pueden interpretar como una **versión microscópica del principio de Huygens**, en la que los “puntos” materiales a los que llega la luz se convierten en focos emisores de luz nueva. Al atravesar un medio material no transparente la luz se va renovando: van desapareciendo fotones de la luz incidente y apareciendo nuevos fotones que forman parte de la luz saliente.

Velocidad de la luz

La descripción anterior de la absorción-emisión de luz también permite entender por qué, aunque los fotones viajan solo en el vacío y siempre a velocidad c , la velocidad de la luz es menor que c al atravesar un medio material no transparente. La razón es que la absorción de un fotón incidente y la correspondiente emisión de un fotón saliente no son simultáneas, sino que hay un retraso temporal en la emisión. Así, la velocidad de la luz en el medio, definida como el cociente entre la distancia recorrida por la luz (renovada) y el tiempo promedio por fotón incidente empleado en recorrerla, es tanto menor que c cuantas más absorciones-emisiones tengan lugar. Una imagen nemotécnica sugerente para explicar esto es la de un fotón como un relevista en una carrera. Corre a velocidad c durante su relevo, pero tarda tiempo en la entrega del testigo a otro fotón.

Difracción e interferencias. Reflexión y refracción. Polarización

La descripción de la difracción e interferencias, así como de la reflexión, refracción y polarización de la luz, con el modelo fotónico, pone de manifiesto que **los fotones no se comportan como corpúsculos clásicos**.

Para mostrar esto en clase se puede empezar aludiendo al experimento pionero de Taylor de 1909 [2], que fotografió la sombra esparcida de una aguja en una pantalla, mostrando que era la misma (el mismo patrón de difracción) tanto cuando usaba luz intensa correspondiente a un gran número de fotones, como cuando, durante mucho más tiempo de exposición, casi tres meses, usaba una luz tan débil que su energía por unidad de tiempo era, en promedio, menor que la de un fotón. Después conviene comentar que, análogamente, en el experimento de doble rendija de Young, si se usa también luz muy débil, se puede observar cómo se van formando, impacto a impacto (fotón a fotón) en la pantalla, las franjas de interferencia (figura 7).

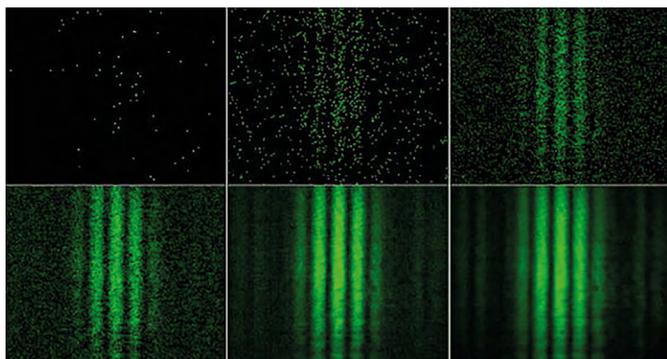


Fig. 7. Ejemplo de secuencias temporales del experimento de doble rendija fotón a fotón [3].

Este comportamiento fotónico es totalmente incompatible con el de un corpúsculo clásico, que nunca daría lugar a esos patrones de difracción e interferencias.

Conviene añadir que en un experimento de reflexión y/o refracción, con luz muy débil, los detectores de fotones acaban registrando máximos de cuentas en las direcciones correspondientes a las leyes de la reflexión y la refracción. De forma análoga, en experiencias de polarización como la birrefringencia se reproducen, fotón a fotón, los resultados experimentales.

Resumen y crítica

Las aplicaciones desarrolladas en este apartado han de permitir a los estudiantes tener un conocimiento amplio del modelo fotónico y saber que, aunque este modelo proporciona una descripción a escala microscópica de los procesos en que interviene la luz, esta descripción es, o puramente cualitativa, como en el caso de la difracción e interferencias, donde el modelo se limita a presentar los resultados experimentales, o solo parcialmente cuantitativa, como en el efecto fotoeléctrico, donde se puede calcular la frecuencia umbral, pero no la tasa de electrones salientes frente a fotones incidentes (sección eficaz).

Para tener una descripción completa, como se requiere en Física, es necesaria una implementación matemática del modelo que corresponda a una teoría cuántica, capaz de explicar en forma cuantitativa todos los procesos con luz conocidos experimentalmente y de predecir los resultados de nuevos procesos que se puedan diseñar en el laboratorio.

4. Teoría cuántica

La teoría cuántica de la luz, o electrodinámica cuántica, nació 20 años después del experimento de Taylor y completó su desarrollo formal 20 después. Describe el comportamiento cuántico de los fotones y de sus interacciones con la materia, proporcionando una descripción cuantitativa completa del comportamiento de la luz.

Proponemos hacer en clase una breve introducción de esta teoría, que puede iniciarse arguyendo que, al igual que un sistema material, como, por ejemplo, un electrón, se describe cuánticamente mediante una función de onda que representa una amplitud de probabilidad, un fotón también se describe mediante una amplitud de probabilidad, que es una función de la posición y del tiempo. El módulo al cuadrado de esa función, en una posición y un instante dados, representa la densidad de probabilidad de presencia de un fotón en ese punto y en ese instante.

Se puede ilustrar el significado de esta descripción probabilística en algunos de los procesos mencionados anteriormente. Por ejemplo:

- i) En el experimento de la doble rendija, fotón a fotón, se producen más (menos) impactos en las zonas de la pantalla en las que la densidad de probabilidad del fotón es mayor (menor), hasta formar la figura de interferencia.
- ii) En un experimento de reflexión (refracción), para luz incidente en una dirección dada, la probabilidad de detectar al fotón es máxima en un detector situado en la dirección de salida predicha por la ley de la reflexión (refracción) de la luz.
- iii) En una experiencia de polarización, como la birrefringencia, la probabilidad de detectar al fotón presenta un

máximo para cada uno de los detectores situados según las dos direcciones de salida de la luz (cada fotón solo es registrado por uno de los detectores). La polarización está relacionada con una propiedad intrínseca del fotón denominada espín.

- iv) En el efecto fotoeléctrico, la probabilidad de que el fotón arranque un electrón del metal sobre el que incide determina la tasa de producción de electrones salientes frente a fotones incidentes.

Proponemos también desarrollar alguna explicación gráfica del funcionamiento de la teoría, haciendo uso de que la amplitud de probabilidad del fotón en una posición y un tiempo es un número complejo, representable mediante un vector en el plano que tiene su origen en dicha posición (figura 8).



Fig. 8. Vector que representa en un instante dado la amplitud de probabilidad de un fotón en la posición P. El cuadrado de su longitud indica la densidad de probabilidad de presencia del fotón en ese punto. La fase, Φ , está determinada por el tiempo. A medida que aumenta este, también aumenta Φ , y el vector va girando en sentido contrario a las agujas del reloj.

Por ejemplo, se puede estudiar la reflexión especular de la luz, considerando una fuente emisora cuyas frecuencias estén en un intervalo muy pequeño alrededor de un valor central, y suponiendo que la luz emitida por ella se propaga en el vacío e incide sobre un espejo plano antes de alcanzar un detector (figura 9) [4]. Como la luz es emitida por la fuente en todas las direcciones, al detector puede llegar luz reflejada desde cualquier punto del espejo (figura 9(a)), siendo el tiempo de recorrido desde la fuente al detector diferente para cada camino y mínimo para uno de ellos (figura 9(b)).

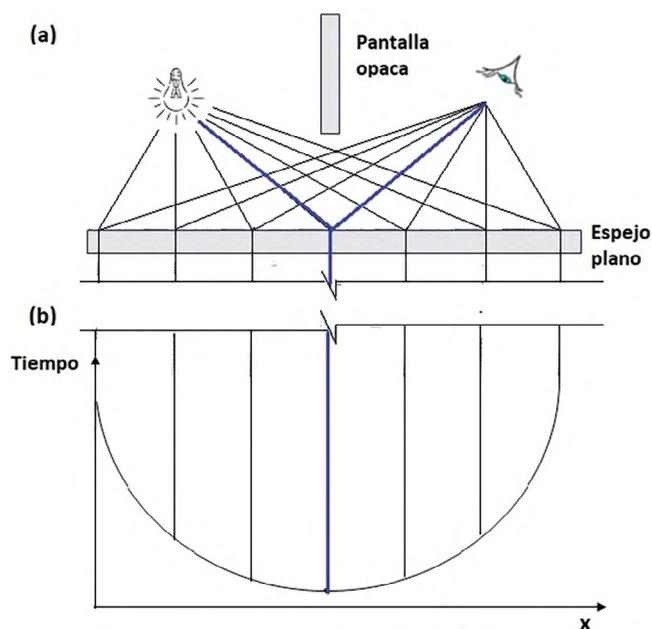


Fig. 9. (a): Algunos caminos de la luz entre la fuente y el detector (aunque solo se han dibujado caminos radiales se pueden tener caminos de cualquier tipo; se ha colocado una pantalla opaca entre la fuente y el detector para indicar que la luz que llega a este procede solo del espejo). (b): Representación del tiempo recorrido por la luz desde la fuente hasta el detector (es mínimo para el camino destacado en color azul).

En cada instante, la amplitud de probabilidad en el punto en que está el detector es la suma de las amplitudes de probabilidad en ese punto correspondientes a los diferentes caminos. Como la fase de cada amplitud de probabilidad depende del tiempo de recorrido desde la fuente, en el detector se tiene una fase diferente para cada camino. Estas fases determinan las interferencias, es decir, si las amplitudes de los diferentes caminos se cancelan o se realzan entre sí (equivalente a decir que la suma de los vectores que representan a las amplitudes da un vector de menor o mayor módulo).

Un análisis detallado muestra que las amplitudes correspondientes a los caminos que están a la izquierda no inmediata del de tiempo mínimo (e igualmente las de los que están a la derecha no inmediata) se cancelan entre sí (interfieren destructivamente) en el detector, debido a la rápida variación de la fase, asociada a la rápida variación del tiempo de un camino a otro (como se aprecia en la figura 9(b)). En cambio, los tiempos de recorrido para los caminos que están próximos al de tiempo mínimo son casi iguales entre sí porque sus fases son muy similares y ello da lugar a una amplitud resultante no nula (interferencia constructiva) en el detector. Ambos casos se representan esquemáticamente en la figura 10.

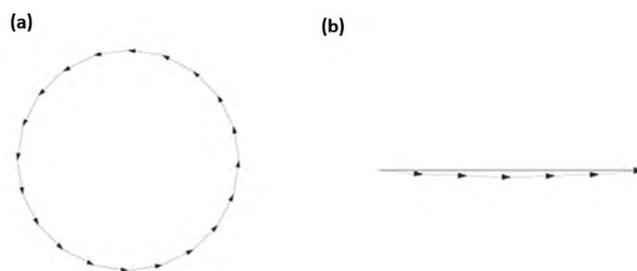


Fig. 10. Representación esquemática de la suma de amplitudes de probabilidad en el detector en un instante dado. (a): Suma nula de amplitudes de caminos no próximos al de tiempo mínimo. (b): Suma no nula de amplitudes de caminos próximos al de tiempo mínimo.

Por tanto, se concluye que la amplitud de probabilidad en el detector es la que corresponde al camino de tiempo mínimo (que incluye los caminos vecinos inmediatos). Lógicamente, para cada posición del detector se tiene un camino de tiempo mínimo diferente, con un punto de incidencia distinto sobre el espejo.

Estos caminos de tiempo mínimo proporcionan una explicación cuántica a los rayos de luz que se utilizan en la descripción clásica para indicar las direcciones de propagación de la luz. También permiten entender las leyes de la reflexión y de la refracción: cuando un rayo de luz incide según un ángulo determinado sobre la superficie de un medio material, los ángulos de salida predichos por estas leyes corresponden a los de los caminos más probables, que son los de tiempo mínimo.

Para complementar el ejemplo anterior, se puede desarrollar la explicación gráfica del experimento de la doble rendija. Se puede considerar, por sencillez, una fuente puntual de luz, equidistante de ambas rendijas (puntuales), cuyas frecuencias están en un intervalo muy pequeño alrededor de un valor central, y que la luz se propaga en el vacío. En cada punto de la pantalla se obtiene la suma de dos amplitudes de probabilidad correspondientes a los dos caminos de tiempo mínimo desde la fuente pasando por las rendijas. Cuando esos tiempos sean tales que los vectores correspondientes a las

amplitudes tengan la misma dirección y sentido, el módulo del vector suma tendrá el mayor valor posible, la densidad de probabilidad será máxima y se tendrá un máximo de luz (como, evidentemente, ocurre en el punto central de la pantalla, que equidista de ambas rendijas). En cambio, cuando los tiempos de ambos caminos sean tales que los vectores tengan la misma dirección y sentido contrario, se tendrá un mínimo de luz. De esta forma, considerando todas las situaciones intermedias, queda descrita la figura de interferencia.

Para finalizar esta breve introducción a la teoría cuántica proponemos hacer énfasis en que la electrodinámica cuántica, que implementa el modelo fotónico de la luz, tiende, en el límite de un número muy grande de fotones por unidad de frecuencia, a la electrodinámica clásica de Maxwell, que es la teoría efectiva macroscópica subyacente en el modelo ondulatorio clásico de la luz.

5. Epílogo

Después de que los estudiantes de Bachillerato constatan el fracaso del modelo ondulatorio clásico de la luz para explicar algunos procesos físicos que requieren la consideración de interacciones a nivel microscópico entre luz y materia, es habitual introducir en clase un modelo de la luz en términos de fotones y limitar su aplicación a explicar algunas características de esos procesos físicos particulares.

En este artículo hemos mostrado que este modelo, combinado con otros conocimientos adquiridos previamente, proporciona una descripción microscópica general, a nivel cualitativo, de los procesos en que interviene la luz. También hemos visto que, para tener una descripción completa, se requiere la implementación del modelo hacia la teoría cuántica de la luz, o electrodinámica cuántica, que sí es capaz de explicar en forma cuantitativa todos los procesos con luz conocidos experimentalmente, así como de predecir los resultados de otros que se puedan diseñar en el laboratorio. Hemos incluido una breve introducción a la descripción probabilística de la luz en esta teoría, para que los estudiantes puedan entender su significado y saber que de ella se deriva, en el límite de un número muy grande de fotones por unidad de frecuencia, la descripción del modelo ondulatorio clásico.

Agradecimientos

P. G. agradece la financiación de la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital, de la Generalitat Valenciana mediante el proyecto GVA PROMETEO/2021/083, la del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades junto con la Agencia Estatal de Investigación, MCIU/AEI/10.13039/501100011033, mediante el proyecto Severo Ochoa CEX2023-001292-S y la de la Unión Europea mediante la EU Horizon 2020 Grant No. 824093 (STRONG-2020).

Referencias

- [1] Th. YOUNG, The Bakerian Lecture: On the theory of light and colors, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **92**, 12 (1802).
- [2] G. I. TAYLOR, Interference fringes with feeble light, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **15**, 114 (1909).
- [3] T. L. DIMITROVA y A. WEIS, The wave-particle duality of light: A demonstration experiment, *American Journal of Physics* **76**, 137 (2008).
- [4] P. GONZÁLEZ MARHUENDA, *La Naturaleza de la Luz* (PUV, 2018).

Cúbits para tocar con las manos

Jorge Pérez-Bailón

Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza



Fernando Luis

Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza



María José Martínez-Pérez

Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza



La computación cuántica está cada vez más cerca de volverse una realidad, pero al mismo tiempo se aleja de la comprensión de la sociedad. Con nuestros cúbits “para tocar con las manos”, podremos explicar de manera tangible conceptos como la teleportación cuántica y las desigualdades de Bell.

Parecía realmente lejano y, sin embargo, la posibilidad de ver funcionar un ordenador cuántico tolerante a fallos va tomando forma. En paralelo, también avanza el desarrollo de algoritmos que muestren ventaja cuántica, intentando encontrar aplicaciones que impacten en la sociedad. Gracias a esta tecnología, es posible que en el futuro podamos realizar predicciones financieras, optimizar procesos logísticos, encriptar información segura, simular materiales que aprovechen mejor la energía o diseñar medicamentos a la carta. La sociedad necesita estar preparada para ese momento y ser consciente de sus implicaciones en seguridad y soberanía. El reto es hacer la mecánica cuántica accesible a todo el mundo, sin necesidad de que tengan un grado en física, y hacerlo de modo sencillo, enfatizando la importancia que esta segunda revolución cuántica tendrá sobre nuestras vidas.

Nuestro objetivo es explicar nociones básicas de computación y comunicación cuántica a la sociedad. Para ello, hay dos conceptos básicos con los que se suele comenzar: la superposición y el entrelazamiento. Sin embargo, la descripción matemática de estos estados no suele ser apta para todos los públicos. Esto hace difícil transmitir su significado profundo, cayendo en tópicos como “las partículas pueden estar en dos sitios a la vez”. Además, aun suponiendo que hemos sido capaces de transmitir estos conceptos de manera eficaz, nos enfrentamos a otro reto mayúsculo: describir un algoritmo cuántico [1].

Revisemos, por ejemplo, la secuencia necesaria para hacer teleportación cuántica [2] resumida en la figura 1. Alice tiene