Lo que conocemos coloquialmente como “el color de las cosas” es el resultado de varios procesos cuya naturaleza es, en la mayor parte de los casos, intrínsecamente cuántica. El fenómeno es producto de eventos simultáneos en ambos protagonistas: el observador y lo observado. Así, encontramos un nexo insospechado entre nuestra experiencia cotidiana del color y los principios cuánticos subyacentes responsables.

[ILUSTRACIÓN: DIMITRIJ STROGANOV / ISTOCK]

Nuestra concepción de la luz y el color tiene una historia larga y sinuosa. En sus orígenes, estuvo fuertemente condicionada por los caprichos de la experiencia visual subjetiva. Hoy en día, podemos distinguir sus aspectos físicos (la luz como fenómeno electromagnético y fundamentalmente cuántico), fisiológicos (su detección en el ojo y comunicación al cerebro) y psicológicos (su interpretación en términos de color). Sin embargo, en la antigüedad no estaba claro en absoluto.

Empédocles (siglo V a. C.) propuso una teoría integral de la luz y la visión que combinaba dos ideas: la luz es una emanación que viaja y la visión implica un rayo que sale del ojo. Es la idea de la extramisión, hoy en día equivalente a un terraplanismo óptico y que puede rastrearse hasta películas como El hombre con rayos X en los ojos o Superman. Por contraparte y en la misma época, Leucipo defendió tempranamente la idea de intromisión, según la cual los objetos emiten efluvios recibidos por el ojo permitiendo la visión.

En el siglo XI, Alhacén explicó (con argumentos que lo acercan a la ciencia moderna) que la visión es debida a la luz reflejada en los objetos y dirigida a los ojos. Quedó pendiente, sin embargo, la discusión acerca de la naturaleza misma de la luz que, en siglos posteriores, involucró a Newton (s. XVII-XVIII, defensor de la teoría corpuscular) y Huygens (s. XVII, promotor de la teoría ondulatoria), entre otros más excéntricos como el jesuita Athanasius Kircher (s. XVII) y el poeta Goethe (s. XVIII-XIX), quienes reparaban ante todo en la experiencia sensorial del color.

Luz y materia

A principios del siglo XIX, Young demostró que la luz era un fenómeno ondulatorio mediante una serie de experimentos de interferencia ya clásicos, con una doble rendija. La luz consistía en ondas, ¿pero ondas de qué?

Estudios posteriores establecieron que la luz es una oscilación del campo electromagnético que se propaga en el vacío a una velocidad de aproximadamente 300.000 km/seg. La llamada luz visible, la que percibimos con nuestros ojos, no es más que una diminuta fracción de un espectro que va desde las suaves ondas de radio a los muy energéticos rayos gamma, invisibles a esos mismos ojos (pero no a otros órganos, como la piel, donde las radiaciones infrarrojas son percibidas como calor y las ultravioletas dejan su impresión en el bronceado).

Los distintos colores que observamos al descomponer la luz visible con un prisma corresponden, por tanto, a distintas frecuencias de oscilación de esas ondas. Una característica notable de la teoría electromagnética es que vincula decisivamente la luz a sus fuentes: las cargas eléctricas en movimiento. Las radiaciones electromagnéticas son producidas por cargas eléctricas aceleradas que forman la materia misma, como los electrones o los protones, ya sea en una antena (ondas de radio o microondas), en una bombilla o un LED (luz visible), en un tubo de rayos X o en un núcleo atómico que se desintegra (rayos gamma). En definitiva, luz y materia están asociadas de modo fundamental: las cargas eléctricas pueden perder o ganar energía

emitiendo o absorbiendo ondas electromagnéticas. Ahora bien, ¿cómo sucede esto?

Pequeños paquetes de energía

Hacia 1900, el desafío tecnológico de convertir la iluminación de gas en eléctrica impulsó a la comunidad científica a estudiar los mecanismos de emisión de luz en los cuerpos incandescentes. En un intento por reproducir su espectro de emisión y evitar la llamada «catástrofe ultravioleta» (una emisión exagerada de radiaciones muy energéticas, predicha por la teoría clásica del electromagnetismo, que no se cumple en la práctica), Max Planck descubrió que este fenómeno requería una nueva construcción teórica en la que las ondas lumínicas fueran emitidas en pequeños paquetes de energía.

De este modo, la energía total emitida debía ser múltiplo de una cantidad mínima indivisible, que dependía exclusivamente de la frecuencia de oscilación de la luz (o, en otras palabras, de su "color"). Planck denominó «cuanto» a cada uno de estos paquetes de energía, y ya nada volvió a ser igual.

Lo que para Planck fue un artificio matemático, en manos de Einstein se convirtió en una pieza fundamental del puzzle de la naturaleza. Comprendió que los cuantos permitían explicar el efecto fotoeléctrico, una respuesta singular a la absorción de luz en metales según su frecuencia, que la teoría electromagnética clásica no podía explicar.

En el campo de la espectroscopía atómica –conjunto de técnicas analíticas que estudian la interacción de la radiación electromagnética con los átomos para determinar la composición elemental de una muestra–, los cuantos de luz (finalmente denominados «fotones») explicaban las líneas de emisión y absorción como transiciones de energía bien definida entre los estados electrónicos en los átomos. Más importante aún: estos fenómenos revivieron la interpretación corpuscular de la luz, pero sin desplazar sus características ondulatorias previamente establecidas. Son hallazgos centrales para entender la relación entre luz y cuántica, como veremos a continuación.

Raíces cuánticas del color

De acuerdo a lo anterior, cuando un haz de luz incide sobre un material (lo observado), los fotones que lo componen solo pueden ser absorbidos si su energía coincide con el escalón energético existente entre dos niveles electrónicos del material. Cuando esto ocurre, los electrones que se encuentran en el nivel de energía más bajo, conocido como "fundamental", pasan a un nivel superior, el estado "excitado". Estos electrones, transcurrido un tiempo (típicamente, del orden de la milmillonésima de segundo), pueden relajarse y volver a su estado fundamental, ya sea a través de vibraciones de los átomos o moléculas que forman el material o emitiendo fotones de menor energía.

La energía inicialmente absorbida puede, por tanto, devolverse al entorno en forma de calor (disipación) o de luz (luminiscencia). Todos estos procesos tienen lugar entre estados discretos (es decir, escalonados: sistemas o variables que solo pueden tomar valores fijos y separados, como encendido/apagado, 0 o 1) de las partículas involucradas, ya sean fotones, electrones o vibraciones, cuyas propiedades vienen establecidas por la mecánica cuántica.

Sin embargo, ¿qué ocurre con la luz incidente cuya energía no coincide con ningún salto entre niveles electrónicos del material? Simplemente, no es absorbida y, por tanto, los fotones que la componen son necesariamente reflejados o transmitidos. Son precisamente estos fotones los que llegan hasta nuestros ojos (los del observador) y determinan el color de los objetos que observamos.

Ojos cuánticos

Después de atravesar córnea, pupila, cristalino y humor vítreo, los fotones reflejados, transmitidos o emitidos por el objeto de nuestra observación, llegan a la retina. Allí, a su vez, excitan unos receptores denominados conos que contienen pigmentos encargados de absorber los fotones de los distintos colores. Esta captura se produce mediante un proceso similar al descrito para la absorción de luz que tiene lugar en el objeto observado, es decir, intrínsecamente cuántico.

Los conos convierten la señal luminosa que reciben en eléctrica y esta viaja por el nervio óptico hacia el cerebro hasta llegar a la corteza visual, que interpreta, invierte y da sentido a dicha señal. Así, los distintos colores que percibimos dependen tanto del catálogo de niveles energéticos de los objetos observados, ya que estos determinan la energía de los fotones que serán reflejados, transmitidos o emitidos, como del buen funcionamiento de los receptores en nuestra retina.

Un fallo en la detección por alguno de estos receptores (cianopsina para el azul, cloropsina para el verde, eritropsina para el rojo) da lugar a la disfunción cromática conocida como daltonismo. Tanto en lo observado como en el observador, los procesos involucrados en el fenómeno del color solo pueden describirse adecuadamente gracias a la teoría cuántica elaborada inicialmente por Einstein y Planck para explicar el espectro de emisión de objetos tales como lámparas o estrellas.

Colores clásicos y pompas de jabón

Una puntualización final. Si bien toda luz es de origen cuántico, así como lo son la mayor parte de fenómenos responsables del color, hay muy significativas excepciones. El blanco de las nubes, el brillo tornasolado de un escarabajo, el reflejo iridiscente de una pompa de jabón... son todas ellas expresiones del fenómeno del color que pueden explicarse considerando únicamente la naturaleza ondulatoria de la luz, ya descrita con precisión en el siglo XIX en el marco de la física clásica, sin necesidad de involucrar ningún concepto cuántico.

En todos estos casos, el color que observamos es el resultado de la forma en la que se encuentra estructurada la materia en escalas de longitud del orden de la micra (una millonésima de metro). En lugar de la absorción o emisión de luz debidas a saltos de los electrones entre niveles de energía bien definidos, indispensables en física cuántica, los procesos relevantes en estos ejemplos son la dispersión, interferencia y difracción de la luz. Estos dependen no tanto de la estructura electrónica de los materiales, como de la manera en que varía la propagación de las ondas lumínicas al atravesar regiones de distinto índice de refracción.

Se trata de un fenómeno conocido como color estructural, que produce algunos de los colores más llamativos de la naturaleza. La física subyacente en estos casos es, si bien conceptualmente menos compleja que la cuántica, igualmente fascinante.