

Explorando los límites entre luz y materia

Una historia de la dispersión óptica de larga duración, desde la física clásica a la cuántica

Por Marta Jordi Taltavull

La dispersión óptica es el fenómeno físico que da lugar a los arco iris y a la formación de espectros de luz a través de prismas. Aunque resulte fácil de observar, este fenómeno ha sido sorprendentemente difícil de explicar a lo largo de los siglos, ya desde los primeros intentos de Newton, pues requiere la combinación de teorías tanto de la luz como de la materia.

Además, sus varias interpretaciones físicas entre finales del siglo XIX y principios del XX jugaron un papel clave en dos revoluciones científicas: el paso a la microfísica, alrededor de 1900, y el nacimiento de la mecánica cuántica, en 1925. Precisamente, el objetivo de esta investigación, como parte del proyecto “Historia y fundamentos de la física cuántica” del Departamento I del Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia de Berlín, es discernir las razones históricas por las que la dispersión óptica fue un actor persistente en los desarrollos

generales de la física durante este período y, con ello, profundizar en los orígenes de la física cuántica a través de su herencia clásica.

Desde los años 1870s hasta los 1920s, toda teoría sobre la dispersión óptica se basó en un mismo modelo físico: las llamadas *Covibraciones*. Desde su misma introducción, este modelo se consolidó como una herramienta básica y fructífera para describir toda interacción entre luz y materia, desde la física clásica a la cuántica. Durante todo este período, el modelo fue adaptado a los más variados marcos

conceptuales, a la vez que mantuvo su estructura matemática intacta. Precisamente, la presente investigación pretende elucidar cómo el modelo de *Covibraciones*, gracias a esta combinación de robustez estructural y flexibilidad conceptual, pudo transmitir el conocimiento sobre luz y materia incluso más allá las diferencias primordiales entre física clásica y cuántica.

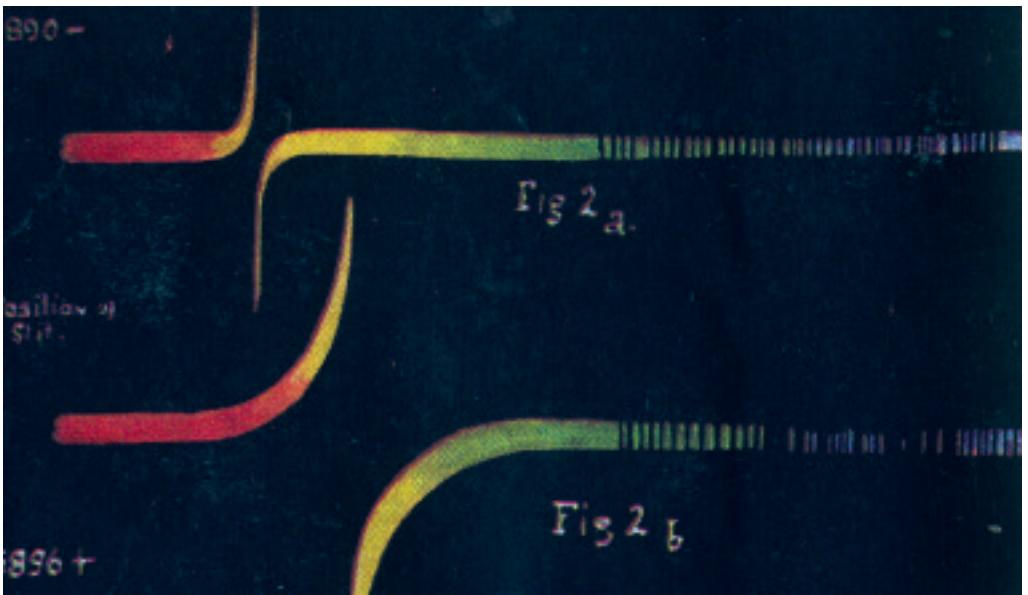
Antes de la introducción de las *Covibraciones*, la luz era concebida como una perturbación periódica de una sustancia invisible que llenaba todo el espacio: el éter. Ni la dispersión óptica ni ningún otro fenómeno óptico se explicaban teniendo en cuenta el movimiento de las partículas de materia en él. En este contexto, el orden de los colores de cualquier espectro de luz debía ser fijo: violeta, azul, amarillo, naranja y rojo.

Sin embargo, entre 1871 y 1872, un hecho sorprendente, que Thomas Preston (1860-1900) describió en 1890 como uno de los “descubrimientos más singulares de los tiempos modernos”, puso en tela de juicio las hipótesis mencionadas en el párrafo anterior: Christian Christiansen (1843-1917) y August Kundt (1839-1894) observaron que, bajo ciertas circunstancias, el orden de los colores de la luz dispersada se invertía, el espectro parecía “volverse hacia sí mismo”. Este extraño fenómeno resultó ser explicable sólo si se tenía en cuenta el comportamiento de las propias partículas de materia en las teorías ópticas. Fue en esta dirección que Wolfgang Sellmeier desarrolló en 1872 la primera teoría de la dispersión óptica en base al modelo de las *Covibraciones*, sentando así los cimientos teóricos para explicar cualquier otro fenómeno óptico que exigiera tratar tanto con luz como con materia. Es decir, Sell-

meier pensó que la dispersión óptica tenía su origen en la interacción entre ondas de luz (perturbaciones del éter) y partículas de materia que, a su vez, estaban vibrando a ciertas frecuencias que coincidían con las frecuencias de resonancia del sistema, en analogía con un sistema acústico.

Precisamente debido a esta naturaleza dual entre luz y materia, la dispersión óptica pronto se convirtió en un tema candente en óptica, a la vez que las *Covibraciones* se consolidaron como herramienta conceptual indispensable. Después de Sellmeier, otros físicos teóricos alemanes abordaron la cuestión aplicando el mismo modelo. Entre otros, Hermann von Helmholtz (1821-1894), Woldemar Voigt (1850-1919), Paul Drude (1863-1906) y Eduard Ketteler (1836-1900).

En la última década del siglo XIX, el modelo de *Covibraciones* fue acomodado a una nueva teoría física que se estaba extendiendo en Alemania, y que permitía unificar fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos bajo un mismo marco conceptual: el electromagnetismo. En este nuevo contexto, las *Covibraciones* podían reinterpretarse fácilmente en términos de partículas oscilantes cargadas eléctricamente interaccionando con luz electromagnética, a la vez que no hacía falta modificar su tratamiento matemático. En 1897, el descubrimiento de la mínima carga eléctrica, llamada “electrón”, y la determinación experimental de sus propiedades microfísicas, abrieron nuevas perspectivas para la aplicación del modelo. Más concretamente, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) y Drude sugirieron una manera de relacionar los datos experimentales sobre dispersión óptica, analizados en base al modelo de *Covibraciones*, con ciertas características espe-



Caracterización de la dispersión anómala en gas de sodio. En: Robert Wood (1911), “Physical Optics”, Macmillan, Nueva York

cíficas de la estructura de la materia, particularmente el número de valencia. A partir de ese momento, el análisis de fenómenos ópticos se convertía en una manera de explorar la microestructura de la materia. Junto a tales desarrollos teóricos, la construcción de montajes experimentales más precisos fue esencial para dar el paso a la microfísica. En el caso particular de la dispersión óptica, la combinación adecuada de interferómetros y refractómetros jugó un papel clave.

A raíz de esta conexión íntima entre dispersión óptica y ciertas características microfísicas de la materia, el modelo de *Covibraciones* entró en conflicto con otra nueva teoría física en 1913: la teoría cuántica. En este año, el joven físico teórico Niels Bohr (1885-1962) propuso el primer modelo cuántico de materia, que fue inmediatamente aceptado por la comunidad de físicos. Según él, los electrones describían órbi-

tas alrededor de núcleos atómicos, determinando así los diferentes estados cuánticos de la materia. La emisión o absorción de luz tenían lugar de forma discreta, cuando un electrón saltaba de una órbita a otra órbita más cercana o más alejada del núcleo, respectivamente. Este modelo era aparentemente irreconciliable con las *Covibraciones* por dos razones. Primera, el modelo de *Covibraciones* conllevaba un intercambio continuo de energía entre luz y materia, a diferencia de lo que establecía Bohr. Segundo, conforme el modelo de *Covibraciones*, el color de la luz emitida o absorbida estaba unívocamente determinado por la vibración mecánica del electrón en el átomo, mientras que en el átomo de Bohr, el color de la luz dependía del salto del electrón entre dos órbitas, y no del movimiento mismo del electrón en dichas órbitas.

A pesar de todo, las *Covibraciones* seguían

proporcionando la descripción más satisfactoria del fenómeno de la dispersión, de manera que se hizo necesario encontrar una solución al conflicto. Dos fueron las propuestas que surgieron en los siguientes años, ambas refiriéndose a la interacción entre luz electromagnética y osciladores en términos de *Covibraciones*, pero atribuyendo a estas últimas entidades diferentes realidades físicas. Por un lado, Arnold Sommerfeld (1868-1851) y Peter Debye (1884-1966) intentaron conciliar las dos alternativas, y concibieron las *Covibraciones* como interacción entre luz electromagnética y “órbitas oscilantes”, en lugar de electrones oscilantes. Su teoría funcionó bien para unos pocos tipos de moléculas simples, pero fue difícil de aplicar a otras moléculas con estructura compleja.

Por otro lado, a principios de los años 1920s, Rudolf Ladenburg (1882-1952) propuso una reinterpretación radical de las *Covibraciones*. Combinó dicho modelo con el formalismo cuántico emergente a partir de la introducción de una nueva analogía, los “osciladores suplentes”, que más tarde fueron llamados “Osciladores virtuales”. La peculiaridad de estos osciladores es que no aludían a ningún tipo de realidad física, como los electrones o las órbitas, sino a los saltos entre órbitas del modelo de Bohr. Con esto, Ladenburg renunció a cualquier posible descripción de las órbitas cuánticas. Siendo los “osciladores virtuales” suficientes para explicar el fenómeno de la dispersión óptica, la nueva teoría de Ladenburg originó un

cambio de enfoque fundamental en toda la teoría cuántica: los saltos electrónicos tomaron el sitio de las órbitas. Poco más tarde, esta reorganización dispuso las bases para la nueva mecánica cuántica. En este sentido, Werner Heisenberg (1901-1926), el padre de la mecánica cuántica matricial y una de las figuras más destacadas de la revolución cuántica, se refirió a la dispersión óptica en 1925 como uno “de los pasos más importantes hacia la mecánica cuántica”.

Por consiguiente, habiendo servido para concebir la interacción entre luz y materia a través de dos revoluciones, y habiéndose adaptado a los más diversos marcos conceptuales (teorías del éter, electromagnetismo, física cuántica), el modelo de *Covibraciones* se convirtió al final en uno de los pilares de la nueva mecánica cuántica. Por un lado, la estructura básica del modelo era fácilmente concebible y conducía siempre a resultados satisfactorios. Por otro lado, ofrecía la flexibilidad suficiente como para que sus elementos constitutivos (ondas y osciladores) pudieran adquirir diferentes significados según la teoría física utilizada. Es más, fue precisamente la persistencia de este modelo a través de diferentes ontologías lo que allanó el camino para la introducción de la analogía “virtual” en la física cuántica, revelando así sus profundas raíces clásicas.

Marta Jordi Taltavull es investigadora predoctoral en el MPIWG desde 2009 (mjordi@mpiwg-berlin.mpg.de).

The full version of this feature and more research topics are accessible at the Institute's website („News/Feature Stories”).