

Explorant els límits entre llum i matèria

Una història de la dispersió òptica de llarga durada, des de la física clàssica a la quàntica

Per Marta Jordi Taltavull

La dispersió òptica és el fenomen físic que dona lloc als arcs de sant Martí i a la formació d'espectres de llum a través de prismes. Encara que sigui fàcil d'observar, aquest fenomen ha estat sorprenentment difícil d'explicar al llarg del temps, ja des dels primers intents de Newton, doncs requereix la combinació de teories tant de la llum com de la matèria.

És més, les diferents interpretacions físiques del fenomen entre finals de segle XIX i principis de segle XX van jugar un paper clau en dues revolucions científiques: els orígens de la microfísica, als voltants del 1900, i el naixement de la mecànica quàntica, en 1925. Precisament, l'objectiu d'aquesta recerca, com a part del projecte "Història i fonaments de la física quàntica" del Departament I de l'Institut Max Planck d'Història de la Ciència de Berlín, és analitzar les raons històriques per les quals la dispersió òptica van esdevenir un actor important en tots els desenvolupaments generals de la física durant aquest període i, amb això, aprofundir

en els orígens de la física quàntica a través de les seves arrels clàssiques.

Entre els anys 1870s i els 1920s, tota teoria sobre dispersió òptica es va basar en un mateix model físic, les anomenades *Covibracions*. Tan bon punt va ser introduït, aquest model va esdevenir una eina bàsica i alhora fructífera per a descriure tota interacció entre llum i matèria, des de la física clàssica a la quàntica. Durant tot aquest període va ser adaptat als més diversos marcs conceptuals, mentre la seva estructura matemàtica persistia intacta. Precisament, aquest projecte de recerca pretén dilucidar com el model de *Covibracions*, gràcies a la combi-

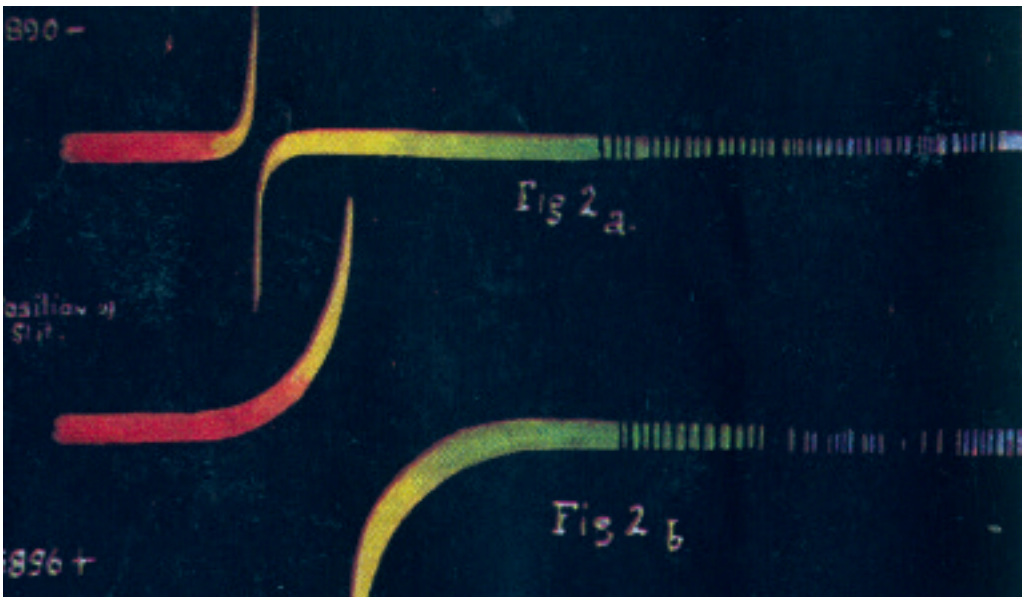
nació de robustesa estructural i flexibilitat conceptual, va poder transmetre el coneixement sobre llum i matèria durant 50 anys, més enllà de les diferències primordials entre la física clàssica i la física quàntica.

Abans de la introducció de les *Covibracions*, la llum era concebuda com una pertorbació periòdica d'una substància invisible que omplia tot l'espai: l'éter. Ni la dispersió òptica ni cap fenomen òptic s'explicaven tenint en compte el moviment de les partícules materials dins aquesta substància. En aquest context, l'ordre dels colors de qualsevol espectre de llum havia de ser fix: violeta, blau, groc, taronja i vermell. Però entre 1871 i 1872, un fet sorprenent, que Thomas Preston (1860-1900) va descriure en 1890 com un dels “descobriments més singulars dels temps moderns”, va posar en dubte les hipòtesis esmentades en el paràgraf anterior: Christian Christiansen (1843-1917) i August Kundt (1839-1894) van observar que, sota certes circumstàncies, l'ordre dels colors de la llum dispersada s'invertia, semblava que l'espectre es “torcia sobre ell mateix”. Aquest estrany fenomen només es va poder explicar incorporant el comportament de les pròpies partícules materials en les teories òptiques. Va ser en aquest esperit que Wolfgang Sellmeier va publicar, en 1872, la primera teoria de la dispersió òptica en base al model de les *Covibracions*, establint així els fonaments teòrics de tota explicació d'un fenomen òptic que impliqués la interacció entre llum i matèria. Específicament, el què va pensar Sellmeier és que la dispersió òptica era conseqüència de la interacció entre ones de llum (pertorbacions de l'éter) i partícules materials, oscil·lant aquestes a determinades freqüències que coincidien amb les freqüències de ressonància del sistema, en ana-

logia amb un sistema acústic.

Precisament degut a aquesta dualitat entre llum i matèria, la dispersió òptica va esdevenir tot seguit un tema candent en totes les publicacions sobre òptica, a la vegada que les *Covibracions* es van consolidar com a eina conceptual indispensable. Després de Sellmeier, altres físics teòrics alemanys van abordar la mateixa qüestió aplicant l'anomenat model. Entre d'altres, Hermann von Helmholtz (1821-1894), Woldemar Voigt (1850-1919), Paul Drude (1863-1906) i Eduard Ketteler (1836-1900).

Durant la darrera dècada del segle XIX, el model de *Covibracions* va ser adaptat a una nova teoria física que s'estava imposant a tota Alemanya, i que permetia unificar fenòmens òptics, elèctrics i magnètics sota un mateix marc conceptual: l'electromagnetisme. En aquest nou context, les *Covibracions* van ser re-interpretades en termes d'interacció entre partícules oscil·lants carregades elèctricament i ones de llum electromagnètica, mentre el seu tractament matemàtic no es va veure modificat. En 1897, el descobriment de la mínima càrrega elèctrica, anomenada “electró”, i la determinació experimental de les seves propietats microfísiques, van obrir noves perspectives per a l'aplicació del model. Més concretament, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) i Drude van suggerir una manera de relacionar les dades experimentals sobre dispersió òptica, analitzades en base al model de *Covibracions*, amb certes característiques específiques de l'estructura de la matèria, particularment el nombre de valència. A partir d'aquell moment, l'anàlisi de fenòmens òptics va esdevenir una manera d'explorar la microestructura de la matèria. Juntament amb tals desenvolupaments, la construcció de muntatges experimentals més precisos va ser



Caracterització de la dispersió anòmla en gas de sodi. En: Robert Wood (1911), “Physical Optics”, The Macmillan Company, New York.

essencial per a donar el pas a la microfísica. En el cas particular de la dispersió òptica, la combinació adequada d'interferòmetres i refractòmetres jugà un paper clau.

Va ser degut a aquesta connexió íntima entre dispersió òptica i certes característiques microfísiques de la matèria que el model de *Covibracions* va entrar en conflicte amb una nova teoria física en 1913: la teoria quàntica. En aquell any, el jove físic teòric Niels Bohr (1885-1962) va proposar el primer model quàntic de matèria, el qual va ser immediatament acceptat per la comunitat de físics. Segons aquest model, els electrons descriuen òrbites al voltant dels nuclis atòmics, determinant així els diferents estats quàntics de la matèria. L'absorció i emissió de llum tenien lloc de forma discreta, quan un electró passava d'una òrbita a una altra més allunyada o més propera al nucli, respectivament. Aquest model era aparentment irrecon-

ciliable amb el de *Covibracions* per dues raons. La primera, que aquest últim implicava un intercanvi continu d'energia entre llum i matèria, mentre Bohr es referia a un intercanvi discret. Segona, que el model de *Covibracions* establia una relació unívoca entre el color de la llum emesa o absorbida i la freqüència de vibració de l'electró, mentre que en l'àtom de Bohr, el color de la llum depenia del salt de l'electró entre dues òrbites, i no del moviment mateix de l'electró en les anomenades òrbites.

Malgrat tot, les *Covibracions* seguien proporcionant la descripció més satisfactòria del fenomen de la dispersió, així que es va fer necessari trobar una solució al conflicte. Dues són les propostes que es van suggerir en els anys següents, ambdues aplicant el model de *Covibracions*, però atribuint a les entitats oscil·lants que interaccionaven amb la llum diferents realitats físiques. Per un costat, Arnold Sommer-

feld (1868-1851) i Peter Debye (1884-1966) varen intentar conciliar les dues alternatives, concebint les *Covibracions* en termes d'una interacció entre llum electromagnètica i "òrbites electròniques oscil.lants", en lloc d'electrons oscil.lant. Aquesta teoria va funcionar bé per a unes poques molècules simples, però va ser difícil d'aplicar a molècules d'estructura complexa.

Per un altre costat, Rudolf Ladenburg (1882-1952) va proposar a principis dels anys 1920s una reinterpretació radical de les *Covibracions*. Va combinar l'anomenat model amb el formalisme quàntic emergent a partir de la introducció de l'analogia dels "oscil.ladors substituïts", més tard anomenats "oscil.ladors virtuals". La peculiaritat d'aquests oscil.ladors era que no es referien a cap tipus d'entitat física com a tal, siguin els electrons o les òrbites, sinó als salts entre òrbites del model atòmic de Bohr. És a dir, la descripció de les òrbites electròniques esdevenia completament innecessària, essent els "oscil.ladors virtuals", els salts quàntics, suficients per a explicar el fenomen de la dispersió. D'aquesta manera, la nova teoria de Ladenburg no només va originar un canvi fonamental d'enfocament en el tractament de la dispersió òptica, sinó en tota la teoria quàntica: els salts electrònics van prendre el relleu de les òrbites. Precisament va ser aquesta reorganització conceptual en l'utilització del model de *Covibracions* el què va disposar les bases per a la nova mecànica quàntica, tal com Werner Heisenberg

(1901-1926), el pare de la mecànica quàntica matricial i una de les figures més destacades de la revolució quàntica, va afirmar en 1925 en considerar la dispersió òptica com un "dels passos més importants cap a la mecànica quàntica".

En resum, després d'haver donat cabuda al coneixement sobre la interacció entre llum i matèria a través de dues revolucions, i d'haver-se adaptat als més diversos marcs conceptuals (teories de l'èter, electromagnetisme, física quàntica), el model de *Covibracions* es va convertir finalment en un dels pilars de la nova teoria quàntica. Per un costat, l'estructura bàsica del model era fàcilment intel.ligible i conduïa sempre a resultats satisfactoris. Per un altre costat, era conceptualment prou flexible com per a què els seus elements constitutius (ones i oscil.ladors) poguessin ser interpretats de forma diferent segons el llenguatge físic utilitzat. És més, va ser precisament la persistència del model a través de diferents ontologies el què va preparar el terreny per a la introducció de l'analogia "virtual" en la física quàntica, revelant així les seves profundes arrels clàssiques.

Marta Jordi Taltavull és investigadora predoctoral al MPIWG des de 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”).