

Física Moderna

Naturalesa de la llum

La qüestió que històricament s'ha plantejat al voltant de la llum és si és una ona o bé està formada per partícules. És a dir es tractava de decidir entre “la naturalesa ondulatòria de la llum o bé la naturalesa corpuscular de la llum”. Per introduir-nos en aquesta polèmica cal fer una mica d'història, que a grans trets s'exposa a continuació.

Als voltants de l'any 1700 l'holandès Christiaan Huygens va proposar una descripció de la llum en termes ondulatoris.

Aquest model tenia al seu favor algunes evidències. Per exemple, quan les trajectòries de dos raigs de llum es tallen, els dos raigs continuen propagant-se sense alterar-se. Aquest fet té difícil explicació si es considera que els raigs estan formats per partícules. En aquest cas les partícules xocarien i els raigs sofririen una alteració.

La reflexió i la refracció de la llum es podien també explicar mitjançant el principi de Huygens, que com sabem s'aplica a les ones.

Una mica després, l'any 1704, Newton presenta la seva teoria de la llum, a on considera que està formada per corpuscles.

A favor d'aquesta interpretació estaven la formació d'ombres per objectes opacs, enteses com el resultat de l'obstaculització de les partícules de llum per l'objecte.

Alguns aspectes de la reflexió i la refracció de la llum eren explicables per un model corpuscular. Considerem per exemple les lleis de la reflexió de la llum estudiades durant el curs. Si la llum estigués formada per partícules, la reflexió es podria explicar aplicant els principis de conservació de la quantitat de moviment i de l'energia al xoc d'una partícula contra una superfície.

En contra del model corpuscular només una qüestió. Si la llum estigués formada per partícules amb una certa massa, com és que un cos que emet llum no perd massa?

Durant més d'un segle, el XVIII, el punt de vista del Newton es va imposar en el món científic de l'època.

Per què?

Cal pensar en el prestigi i influència del Newton en aquella època. El seu pes en el món científic es considerava aclaparador. Apart, el model corpuscular de la llum és més senzill que l'ondulatori. Per un motiu o per l'altre el fet és que es va imposar el model corpuscular de la llum.

A principis del segle XIX es realitzen experiències que mostren les interferències produïdes en superposar en una regió de l'espai dos o més raigs de llum.

En concret, a l'any 1803, Thomas Young realitza el seu famós experiment conegut amb el nom de l'experiment de les dues escletxes de Young.

El francès Fresnel al voltant de 1818 aconsegueix explicar el fenomen de difracció a partir del model ondulatori.

Com hem vist en un tema anterior, el fenomen de les interferències es pot explicar, tant en la llum com en el so, adoptant pels dos, llum i so, un model ondulatori.

L'explicació d'aquests fenòmens a partir del model ondulatori suposa una evidència tan important a favor d'aquest model, que s'abandona completament l'altre, el corpuscular.

Quedaven algunes coses i molt importants encara pendents.

Quedava per esbrinar el caràcter longitudinal o transversal de les ones de llum, i una qüestió encara més fonamental, què és el que vibrava?

En el so se sabia que el que vibrava eren les partícules (molècules) del medi de propagació (aire o altres), però en la llum s'ignorava completament qui jugava el paper equivalent a les molècules d'aire en el so.

En quant a la primera qüestió la resposta és que la llum és una ona de caràcter transversal, com posen de manifest els fenòmens de polarització de la llum i en quant al segon, retornem a la història per trobar la resposta, però canviant aparentment d'escenari. Abandonem la llum per anar al món de l'electromagnetisme.

A principis del segle XIX l'electricitat i el magnetisme eren considerades branques separades de la física. L'anglès Michael Faraday s'encarregaria de demostrar durant el primer terç del segle que això no era cert. Faraday un dels físics més importants que han existit és considerat un físic experimental, que descobrí el motor elèctric i el fenomen de la inducció electromagnètica (Llei de Faraday-Lenz). A partir d'ell l'electricitat i el magnetisme mai més s'han considerat separadament, sinó conjuntament en una branca anomenada electromagnetisme.

Com dèiem Faraday era un físic experimental, l'escocés James Clerk Maxwell en canvi s'ha de considerar més aviat un físic teòric. Maxwell va resumir en un conjunt d'equacions que porten el seu nom tots els fenòmens coneguts fins al moment (1865), incloent els descobriments del Faraday. Una d'aquestes equacions és la que hem estudiat en aquest curs com a Llei de Faraday-Lenz.

Però Maxwell va construir unes equacions que anaven més enllà. Predeïen l'existència de nous fenòmens. En concret l'existència de camps magnètics i elèctrics que es propaguen per l'espai. En altres paraules, predeïa l'existència d'ones electromagnètiques. Ones que ningú havia produït mai. Avui en dia aquestes ones entre altres coses ens permeten escoltar la radio i veure la televisió, així com connectar-nos a Internet sense fils o via satèl·lit. Us sona?

Però això no és tot. Les seves equacions permetien calcular la velocitat a la que aquestes ones es propagaven, resultant un valor igual al de la velocitat de propagació de la llum que ja s'havia aconseguit mesurar.

Si tot això fos cert s'hauria aconseguit una fita sensacional. El magnetisme i l'electricitat unificades en una única teoria i a més a més inclouria a la llum com una ona electromagnètica. Què vibrava? Doncs un camp magnètic i un camp elèctric propagant-se alhora.

Què faltava per tenir la festa acabada? Doncs descobrir les ones electromagnètiques. La història va reservar aquest paper a Rudolf H. Hertz, un físic alemany que va viure a la segona meitat del segle XIX.

A l'any 1888 en un experiment històric va produir ones de radio i detectar els seus efectes. El cercle s'havia tancat. La qüestió pendent sobre la llum (què vibra?) havia trobat resposta.

En definitiva a finals del XIX l'estat del tema és que la llum és una ona electromagnètica.

En aquest moment era tal l'optimisme de molts en el món de la física com a conseqüència entre altres de tota la història que acabem d'explicar, que alguns es preguntaven si quedaven reptes pendents. Doncs sí, quedaven reptes i molts.

A finals del segle XIX alguns físics estudiaven el conegut com el problema de la radiació del cos negre. Sense entrar en detalls direm que l'aplicació de l'em (electromagnetisme) de Faraday i Maxwell s'obtenia un resultat paradoxal (catàstrofe ultravioleta).

El mateix Hertz havia descobert un fenomen conegut amb el nom de l'efecte fotoelèctric, consistent en l'emissió de l'electrons d'una placa metàl·lica sobre la que incidia radiació electromagnètica (raigs ultravioletes), les lleis del qual no s'explicaven amb l'em clàssic (el de les equacions de Maxwell).

Aquests dos fenòmens qüestionaven el model ondulatori de la llum i de quina manera.

L'explicació de la radiació del cos negre correspon al físic alemany Max Planck. Per aconseguir-ho no va tenir més remei que recórrer a una hipòtesis aliena totalment a l'em clàssic, consistent en suposar que una ona em de freqüència ν té una energia que era múltiple d'una energia fonamental igual a $h\nu$, sent h una constant introduïda per primer cop per Planck i que per aquest motiu porta el seu nom. És a dir

$$E = nh\nu; \quad n=1,2,3\dots$$

$$h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

El problema, com diem, és que en línia amb l'em clàssic l'energia de l'ona no té perquè està limitada a una sèrie de valors. A més, quin significat físic té n en la fórmula anterior, per exemple?

El mateix Planck no ho veia massa clar tot plegat. Ara bé incloent aquesta hipòtesis s'explicava el problema de la radiació del cos negre, que no era poc. Això succeïa l'any 1901 i quatre anys després Einstein donava explicació a l'efecte fotoelèctric.

Efecte fotoelèctric

Recordem com hem dit abans, que l'efecte fotoelèctric és l'emissió d'electrons per una superfície metàl·lica quan la il·luminem amb radiació em de freqüència adequada.

Einstein va explicar totes les propietats del fenomen considerant que la llum està formada per partícules, que avui en dia anomenem fotons i que no tenen massa. Una radiació em de freqüència ν està formada per fotons, cadascun dels quals té una energia $E=h\nu$ i per tant si la radiació té n fotons l'energia de tota ella serà

$$E = nh\nu$$

Observi's que d'aquesta manera n s'interpreta fàcilment com el nombre de fotons de la radiació.

L'efecte fotoelèctric consisteix, seguint a Einstein, en un xoc entre un electró del metall i un fotó, que és completament absorbit per l'electró, el qual es queda amb tota l'energia del fotó incident, energia que en definitiva és la que el permet escapar a les forces atractives que l'han mantingut dintre del metall.

L'equació que regeix l'efecte és un simple balanç energètic

energia del fotó incident = energia per arrancar un e^- del metall + energia cinètica de l' e^- emés
o bé

$$h\nu = \phi + \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2$$

ϕ : S'anomena treball d'extracció i és l'energia que cal per arrancar un electró de la superfície. Cal tenir present que quan més interior sigui l'electró arrancat més energia haurà calgut emprar per arrancar-lo. És per aquest motiu que en la fórmula apareix $v_{\max}$ en l'energia cinètica, perquè seran els electrons arrancats de la superfície els que emergiran amb més energia cinètica.

De les propietats observades experimentalment de l'efecte fotoelèctric només en comentarem una que és de fàcil comprensió tenint aquesta fórmula davant.

Efectivament, se sabia que, donat un metall, l'efecte només tenia lloc quan il·luminàvem una superfície d'aquest

metall amb una radiació de freqüència superior a un valor que representarem per ν_0 i que anomenarem freqüència llindar. Per sota d'aquesta freqüència l'efecte no s'observava.

Podem entendre que això ha de ser així perquè perquè l'electró emergeixi, després d'haver absorbit un fotó cal que li quedi energia després d'haver gastat la que li cal per alliberar-se de les forces atractives del metall, és a dir

$$h\nu \geq \phi$$

el valor de ν que fa que la igualtat sigui certa el representem per ν_0 i per tant s'obté

$$h\nu_0 = \phi$$

que permet escriure l'equació de l'efecte fotoelèctric de la següent manera

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2$$

i tornem a la qüestió inicial d'aquest tema. Què és la llum una ona o una partícula? I la resposta ens porta a una expressió que pot semblar contradictòria, però que s'ha convertit en habitual en la física moderna. L'expressió és “dualitat ona-corpúscle”. La llum té una naturalesa dual. Hi ha fenòmens en què es manifesta com una ona i fenòmens en què es manifesta com a partícula. Podem dir que els fenòmens de propagació (reflexió, refracció, interferències, difracció...) troben una explicació perfecta en el model ondulatori, mentre que els fenòmens d'interacció llum-matèria (efecte fotoelèctric, radiació del cos negre, efecte Compton,...) la troben en el model corpuscular.

No cal dir que aquesta situació des d'un punt de vista teòric no era gens satisfactòria pels físics de l'època. De fet la solució a aquest problema va suposar un revolució en el món de la física amb la descoberta de la mecànica quàntica en la dècada dels anys 20 del segle XX.

Partícules: dualitat ona-corpúscle

Un cop s'havia comprovat que la llum posseïa aquesta propietat estranya que hem anomenat dualitat ona-corpúscle, el físic francès Louis de Broglie (1923) va donar un pas més enllà. Va pensar que si la llum presentava aquest comportament dual, perquè no l'havia de presentar la resta de matèria, per exemple les partícules subatòmiques (electrons...).

De Broglie suggerí (no entrarem en l'argumentació del per què, ni cal a 2n de Batxillerat) que un electró lliure de massa m movent-se a una velocitat v tindria associada una ona amb una longitud d'ona λ ,

$$\lambda = h/mv$$

observi's que el denominador no és més que la quantitat de moviment, p , de l'electró i una freqüència ν que val,

$$\nu = E/h$$

observi's que aquesta darrera igualtat és idèntica que pel cas del fotó ($E=h\nu$).

La hipòtesis de de Broglie només era això, una hipòtesis. Calia proposar un experiment per contrastar-la. De Broglie proposa un experiment de difracció d'electrons per una xarxa cristal·lina (superfície metal·lica) i dos anys més tard (experiment de Davison i Germer) es comprova que els electrons es difracten com la llum.

Al 1925 tenim estesa la dualitat ona-corpúscle a tota la matèria, però no hi ha cap teoria completa que doni cabuda a aquest comportament tan estrany de la matèria. La cosa estava a punt de canviar amb la mecànica quàntica, teoria que en primer terme aplicada als electrons descriu el comportament dual de la matèria.

Mecànica quàntica: principi d'incertesa de Heisenberg

Tots els avenços que portem explicats en la comprensió de la llum i la matèria van donar lloc a una sèrie de treballs teòrics per intentar obtenir una teoria completa, un model matemàtic en definitiva, que donés cabuda a la dualitat ona-còrpuscle. És habitual començar per esmentar l'equació d'Schrödinger, que no estudiarem, i el principi d'incertesa de Heisenberg, que sol ser una mena d'icon de la mecànica quàntica, que molts intenten aplicar fins i tot de manera no justificada fora de la mecànica quàntica.

El principi d'incertesa estableix que és impossible conèixer amb total precisió simultàniament la posició d'una partícula (electró) i la seva velocitat. Si representem per Δx la incertesa en la posició d'una partícula i per Δp_x la incertesa en la component x de la quantitat de moviment (se sol utilitzar p enlloc de v per expressar el principi) s'ha de complir que

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h / 2\pi \text{ (principi d'incertesa)}$$

Posem uns exemples:

a) suposem que coneixem amb precisió total la component x de la quantitat de moviment, és a dir $\Delta p_x = 0$, perquè es compleixi el principi s'ha de tenir que $\Delta x = \infty$, la incertesa en la posició de la partícula és total, en altres paraules la partícula pot estar en qualsevol lloc de l'eix de les x. La situació d'aquest exemple no és massa real. Correspondria a un electró dintre d'un feix de velocitat perfectament coneguda i de longitud infinita. L'electró pot trobar-se en qualsevol punt del feix.

b) Suposem en canvi que $\Delta x = 0$. Tampoc és massa real aquest supòsit, perquè equival a conèixer la posició de la partícula amb una total precisió (amb un nombre infinit de xifres significatives). Però si fos possible voldria dir que no coneixem en absolut la velocitat de la partícula, $\Delta p_x = \infty$. En particular vol dir que la partícula no pot estar aturada. Si ho estigués la velocitat valdria 0 m/s i coneixeríem la velocitat de la partícula amb total precisió, en contra del principi d'incertesa.

Donat que h és molt petit ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) només quan les incerteses de la posició i velocitat són molt petites el principi té conseqüències observables. Per una pilota de tennis de 200g, per exemple, la posició de la partícula és coneguda fins a l'ordre de magnitud del mil·límetre la qual cosa significa que podem conèixer la seva velocitat amb la següent precisió,

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h / 2\pi \Rightarrow 10^{-3} \text{ m} \cdot 200 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \Delta v_x \geq 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} / 2\pi \Rightarrow \Delta v_x \geq 5,27 \cdot 10^{-31} \text{ m/s}$$

és a dir la mínima precisió amb la que hem de conèixer la velocitat de la partícula perquè es compleixi el principi és de $5,27 \cdot 10^{-31} \text{ m/s}$.

Pensem amb la velocitat d'una pilota de tennis mesurada per un aparell electrònic dels que solen haver-hi en les pistes de tennis de competició. La velocitat de la partícula sol ser de l'ordre de 100km/h, posem que la precisió amb què aquests aparells mesuren aquesta velocitat sigui de l'ordre de 0,001m/s, apreciació que sembla bastant raonable i que com es veu està molt per sobre del límit imposat pel principi.

Fem el mateix càlcul per l'electró de l'àtom d'hidrogen. La seva massa val $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. El radi medi d'un àtom d'hidrogen val $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}$. Prendrem per tant com un valor raonable de la precisió amb la que es coneix la seva posició el doble, $50 \cdot 10^{-12}$, que correspon al valor del diàmetre. Si apliquem el principi, s'obté,

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h / 2\pi \Rightarrow 5 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \Delta v_x \geq 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} / 2\pi \Rightarrow \Delta v_x \geq 2,3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

la qual cosa vol dir que pràcticament la velocitat de l'electró és desconeguda i no la podem conèixer si suposem que el principi és cert.

Comentari final

Aquest tema és qualitatiu excepte pel que fa referència a l'efecte fotoelèctric (e.f.) i al principi d'incertesa passant per les fórmules del de Broglie. El tema de l'e.f cal ampliar-lo i per això teniu el llibre i Internet. Així també convé que conegueu l'anomenat espectre electromagnètic, que trobareu també al llibre i a Internet.