

# PLANCK I LA REVOLUCIÓ QUÀNTICA

José Bernabeu Alberola\*

Max Karl Ernst Ludwig Planck va nèixer el 23 d'abril de 1858 a Kiel i va morir el 3 d'octubre de 1947 en Göttingen. Aquest físic alemany, que dona nom en l'actualitat a la prestigiosa xarxa d'instituts d'investigació en física, cursà estudis universitaris a Berlín i Munic, on obtingué el doctorat el 1880. Va iniciar la seua carrera com a professor a la Universitat de Kiel, es traslladà a Berlín l'any 1889 i va ser nomenat catedràtic de física teòrica el 1892, grau que mantingué fins que es va jubilar l'any 1928.

Encara que les investigacions inicials de Planck es van adreçar a la termodinàmica, el 1900 va publicar un treball, "Zur Theorie der Gesetzes der Energieverteilung im Normal-Spektrum" ("Sobre la teoria de la llei de distribució d'energia a l'espectre continu"), que va representar el naixement de la teoria quàntica.

A finals del segle XIX, un problema important de la física consistia a explicar la radiació emesa per un cos calent. Se sabia que la intensitat d'aquesta radiació augmenta amb la longitud d'ona fins un valor màxim i, seguidament, disminueix quan augmenta la longitud d'ona. També es coneixia que l'origen d'aquesta radiació està en les vibracions dels àtoms del cos calent. Per a un emissor perfecte (l'anomenat "cos negre", que emet i absorbeix totes les longituds d'ona), la termodinàmica hauria de ser capaç de proporcionar una expressió teòrica per a aquesta radiació de cos negre. Wilhelm Wien havia descrit l'any 1896, mitjançant una llei empírica, el comportament presentat a longituds d'ona curtes. Lord Rayleigh i James Jeans van deduir una llei capaç d'explicar els resultats de longituds d'ona llargues, però predeia que el cos hauria de tenir una emissió massiva d'energia a longituds d'ona curtes: una absurditat coneguda com a "catàstrofe ultraviolada".

Inicialment, el problema de Planck era molt tècnic: la recerca d'una equació que descriguera correctament l'emissió de radiació per a totes les longituds

d'ona. Quan la va trobar, contenia automàticament els límits de Rayleigh-Jeans a longituds d'ona llargues i de Wien a longituds d'ona curtes. Però seria una gran injustícia per a Planck donar la impressió que el seu descobriment va ser exclusivament el resultat d'interpol·lar dades experimentals! Fins i tot si Planck haguera parat en aquest punt, seria recordat eternament com el descobridor de la llei de radiació. La grandesa científica de Planck es manifesta en la perseverança amb què va continuar provant d'interpretar la seua equació. Respectant les seues idees de molts anys, va plantejar com correlacionar l'entropia d'un oscil·lador amb la seua energia, mitjançant arguments termodinàmics i estadístics. En aquesta comparació, la fórmula de Planck necessitava incorporar un ingredient contrari a la física clàssica: l'energia emesa o absorbida per un oscil·lador solament pot prendre valors múltiples d'una energia elemental  $\epsilon$ , quàntum energètic connectat a la freqüència de la radiació  $\nu$  mitjançant  $\epsilon = h\nu$ .

I així és com va nèixer la teoria quàntica! La natura és selectiva en les quantitats energètiques que un cos pot absorbir i emetre, i tan sols permet múltiples de  $h\nu$ . La introducció de la constant  $h$ , el "quàntum elemental d'acció" (en paraules de Planck), que connecta el quàntum elemental d'energia  $\epsilon$  amb la freqüència  $\nu$  de la vibració, va ser una idea revolucionària, una ruptura radical amb la física clàssica.

A partir del treball de Planck es va produir un moviment irresistible que dugué a aplicar el concepte de "salts" energètics als fenòmens microscòpics dels àtoms i de la radiació. L'any 1905, Albert Einstein va demandar consistència proposant que, si l'energia dels oscil·ladors atòmics en emetre o absorbir radiació prenia valors discrets, la mateixa radiació devia consistir de quàntums energètics: els fotons. Amb la seua existència, Einstein va ser capaç d'explicar l'efecte fotoelèctric. El 1913, Niels Bohr va incorporar aquestes idees en

**«I AIXÍ ÉS COM VA NÀIXER LA  
TEORIA QUÀNTICA!  
LA NATURA ÉS SELECTIVA  
EN LES QUANTITATS  
ENERGÈTIQUES QUE UN COS POT  
ABSORBIR I EMETRE.»**

la seua teoria de l'àtom d'hidrogen. El 1923, Arthur Compton va explicar la dispersió de raigs X. Tots aquests èxits inicials de les idees quàntiques van sembrar el camí per al floriment de la nova teoria quàntica, formulada per De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Pauli,... a partir del 1924.

La mecànica quàntica s'ha revelat com l'eina més poderosa per a entendre i predir tota classe de fenòmens físics i està en la base dels avenços tecnològics de major èxit en la segona meitat del segle XX. Aplicada a àtoms i molècules, la mecànica quàntica és la base i el futur de la química moderna, perquè permet fonamentar de manera rigorosa l'enllaç químic. En els sòlids, els electrons són atrets pels ions que formen la xarxa cristal·lina; quan aquesta interacció es tracta quànticament, els nivells d'energia del mate-

rial formen sèries de valors molt atapeïts anomenades "bandes energètiques". La teoria de bandes permet explicar el comportament de conductors, d'aïllants i de semiconductors, tan utilitzats en la tecnologia electrònica dels temps actuals. El transistor és un dispositiu que permet una gran amplificació del corrent elèctric en petites dimensions. Les tècniques modernes de manipulació de materials permeten l'elaboració d'heteroestructures microscòpiques i els pous quàntics són manifestacions d'aquesta nova tecnologia, els límits de la qual són encara desconeguts. Els microscopis d'efecte túnel, com que eliminen les dificultats de difracció, permeten resoldre distàncies de dimensió atòmica. Sota condicions en què els aspectes quàntics també es manifesten macroscòpicament, com ara a baixes temperatures, la condensació atòmica o de parells de Cooper electrònics condueix a fenòmens tan espectaculars com la superfluïdesa o la superconductivitat, respectivament. La connexió entre la física i la tecnologia en l'àrea de materials és tan estreta que una distinció real entre els dos camps ha desaparegut. Sembla apropiat identificar el segle XX com el "segle quàntic". En física fonamental, s'han explorat distàncies fins una centmilionèsima part de les distàncies atòmiques, sense que s'hagen detectat desviacions de la mecànica quàntica.

Paradoxalment, a pesar del domini amb què hem

apresa a utilitzar la física i la tecnologia quàntica, la interpretació del nucli bàsic de la teoria continua subjecta a múltiples debats. Més enllà del caràcter prob-

abilista, indeterminista, de la mecànica quàntica, els límits de predictibilitat de la qual són exemplificats en les "relacions d'incertesa" de Heisenberg, més enllà de l'evolució acausal associada amb el problema de la mesura, les darreres dècades han singularitzat l'aspecte de no-separabilitat dels sistemes quàntics com el més allunyat dels pressupòsits de la física clàssica. Per a sistemes de dues o més partícules correlacionades, la física quàntica prediu que el tot és bastant més que la suma de les parts i és impossible assignar una descripció objectiva separada a cadascuna de les partícules, un "element de realitat" en terminologia d'Einstein. Einstein va emfasi-

zar aquest resultat a fi de negar-li la categoria de "completesa" a la teoria quàntica. La publicació el 1964 de les "desigualtats de Bell" va traslladar aquest debat interpretatiu i filosòfic al camp de la física, perquè va demostrar el caràcter observable i mesurable d'aquestes correlacions quàntiques més enllà dels límits exigits per una descripció realista separable de tipus clàssic. Tots els experiments realitzats en els últims trenta anys per a procedir a un test de les desigualtats de Bell han confirmat, sense cap mena de dubte, les prediccions de la mecànica quàntica.

Però el darrer capítol encara s'ha d'escriure. L'ús dels estats quàntics entrelaçats no-separables per a tecnologies d'informació i comunicacions, que ara fan els primers passos, pot oferir uns avenços en criptografia i computació quàntiques que ni tan sols es podien albirar fa uns pocs anys.

Tot això va començar fa cent anys amb la hipòtesi dels quants de Plank l'any 1900. El 1918, Max Planck va rebre el Premi Nobel de Física. La constant  $h$  del "quàntum d'acció elemental", la constant de Planck, apareix gravada sobre la làpida de la seua tomba a Göttingen:  $h=6,62 \times 10^{-27}$  erg. s



Max Karl Ernst Ludwig Planck, del qual se celebra enguany la seua hipòtesi dels quants

\*Catedràtic de Física Teòrica. Universitat de València