

LES CONTRIBUCIONS D'EINSTEIN

PER A L'ELABORACIÓ DE LA PRIMERA

TEORIA DELS QUANTA

per Michel Paty

20 (156/octubre 1980)

ciència 3

Durant el primer terç del segle XX hi ha hagut dues grans revolucions al camp de la física, que han donat un autèntic gir copernicà a la nostra concepció de l'univers. De la teoria de la relativitat, una d'elles, ja en parlem en aquest mateix número de (ciència). L'altra, la teoria dels quanta, és l'objecte del present article. Einstein fou el pare de la relativitat, però la seva aportació també fou decisiva en l'elaboració d'aquesta teoria que desembocà a partir del 1927 en la formulació de la mecànica quàntica. Aquesta mecànica donà per primer cop una comprensió científica dels fenòmens atòmics. Michel Paty ens ha escrit un treball on es destaca el paper decisiu que Einstein jugà en aquest procés; un paper, tot s'ha de dir, que ha estat "oblidat" a causa de les diferències que tingué amb el corrent dominant en la física moderna a partir dels anys trenta.

Michel Paty (Bordeus, França, 1938) és maître de recherches al Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) a Strasburg (França). És físic dedicat a les partícules elementals i s'interessa per la filosofia de la ciència. Ha escrit nombrosos articles sobre aquests temes. Col·labora fonamentalment a "La Recherche" i "La Pensée". És el cap de redacció de la revista de reflexió filosòfica "Fundamenta Scientiae". El seu article ha estat traduït per Damià Sabaté.



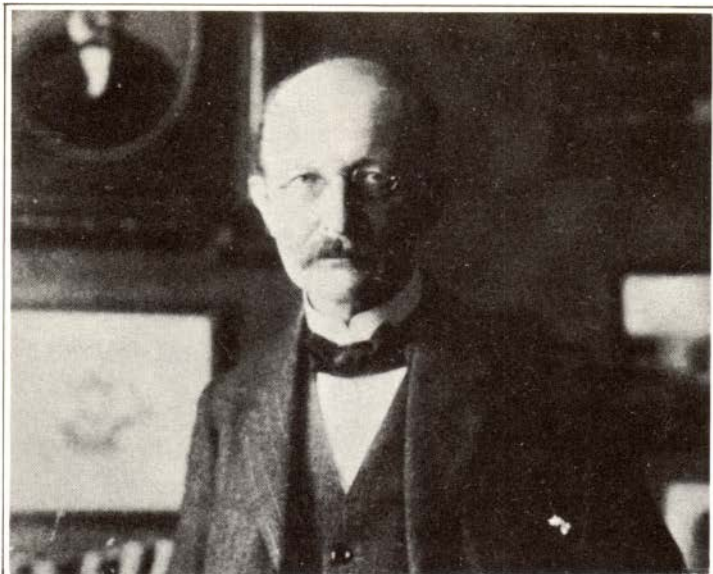
És de Max Born l'observació segons la qual, si suposéssim —cosa impensable— que la concepció del món físic d'Einstein fos divisible en compartiments estancs, i que no hagués escrit una sola ratlla sobre la relativitat, continuaria essent un dels més grans físics de tots els temps. Tan sols se n'estranyaran els qui creuen la llegenda que corre sobre la seva figura i la seva obra, que es refereix fonamentalment a l'inventor de la relativitat restringida i general, i que el converteix en el demiürg de l'espai i del temps, el bruïxot de l'equivalència entre la matèria i l'energia, de la identitat establerta entre la gravitació i la geometria, i el pare teòric —disfressat de profeta— de les cosmogonies modernes. L'aurèola de la llegenda es basa naturalment sobre una realitat, i aquesta es presta força bé a una interpretació i a una deformació espectaculars, puix que hom pot situar-hi l'origen de grans trastorns en les més aparents de les nostres concepcions i en la nostra relació amb el món.

Per altra banda, la branca de les recerques d'Einstein a la qual aquesta imatge exclusiva es refereix, sembla haver estat privilegiada per ell mateix, potser perquè hi va consagrar enterament la segona meitat de la seva vida. Hom pot considerar encara, d'acord amb Louis de Broglie, que la teoria de la relativitat va sortir tota ella del cervell creador d'Einstein mentre que les seves altres contribucions s'inscriuen en un esforç més col·lectiu,

especialment aquesta teoria dels quanta «de la qual Planck posà les primeres pedres» i que deu —sempre segons els termes de De Broglie— «al pensament d'Einstein alguns dels seus més admirables prolongaments». Finalment, és veritat que les seves recerques en la branca de la relativitat i de la teoria del camp varen respondre més immediatament a allò que ell esperava d'una teoria física veritablement fonamentada —que, d'un petit nombre de principis, en començar, se'n derivi lògicament la resta —mentre que va haver de reconèixer, des d'abans dels anys trenta i fins a la seva mort, que es resistia a una aproximació a la realitat com la de la mecànica quàntica.

La posició dels especialistes —físics, historiadors de les ciències, epistemòlegs— pel que fa a aquesta qüestió és ambigua; i és per això que hem esmentat més amunt el mite, que a certs efectes és significatiu. Tots reconeixen que els treballs d'Einstein sobre la física quàntica haurien bastat per a justificar una estatura científica de primera magnitud. ¿No fou precisament «per les seves contribucions a la teoria dels quanta», que li donaren el 1922 el premi Nobel del 1921, i no per la teoria de la relativitat? (Veurem, però, que l'acceptació de les idees d'Einstein, i sobretot de la noció de quantum de radiació, va necessitar molt de temps, força més que les de Planck.) També ens trobem amb la següent dificultat: tot i ésser un dels fundadors de la teoria quàntica amb contribucions majors del 1905 al 1917 —i encara el 1922—, Einstein no va participar en el seu desenvolupament quan es va convertir en una mecànica; al contrari, va aixecar-hi múltiples objeccions en contra. La majoria de científics li ho reprotxarien avui dia i atribuirien el seu refús de les concepcions vigents sobre la mecànica quàntica a un efecte del seu envelliment, fins i tot de senilitat; i veurien, en la seva recerca d'una teoria del camp unificat, més aviat un intent abstracte, especulatiu, brèvol i utòpic; i, en la seva obstinació, l'esclerosi d'un gran talent, testimoniant així el que per a llurs ulls era l'Einstein «empirista» del període precedent, aquell que feia encendre qualsevol fenomen físic amb ardidesa i genialitat, en nom d'un «oportunisme sense escrúpols», que els sembla el més notable. Amb aquesta posició retroben l'exclusiva de la llegenda i esfumen l'assoliment i la significació de la contribució d'Einstein a la teoria quàntica, i el retornen finalment al seu mite de fundador genial, però profeta marginal, envellit i superat.

Són, tanmateix, aquest assoliment i aquesta significació allò que volem considerar. En presentarem aquí com un esbós parcial que serà com un comentari històric dels primers treballs d'Einstein sobre els quanta: el comentari hauria d'ésser perllongat amb una anàlisi epistemològica; aquesta faria veure les concepcions subjacents, i fins i tot les exigències del pensament físic d'Einstein, en seguir-les en la seva evolució, paral·lelament a allò que s'afirma en el mateix moment en els treballs sobre la relativitat. Aleshores seria possible de dir alguna cosa més sobre l'epistemologia i la filosofia pròpies d'Einstein, i de captar millor aquesta unitat de



El professor alemany Max Planck, introductor de la discontinuïtat de l'energia en la física moderna.

la reflexió a la qual al·ludia Max Born, que citàvem al començament —unitat en les seves recerques i en les seves concepcions, unitat com a exigència i com a direcció perseguida—, cosa que permetria de comprendre millor el caràcter de les seves contribucions i la naturalesa de la seva crítica. És a la primera etapa d'aquest programa —el retorn històric— a la qual es referirà aquest article.

Planck: quan la teoria comença a cegues, o la revolució en l'aigua en calma

Els principis de la teoria quàntica han estat l'objecte de prou exposicions detallades perquè hom pugui acontentar-se aquí de recordar-ne tan sols alguns aspectes, en la mesura en què ens aclaririen sobre l'originalitat de la contribució d'Einstein. Hom fixa generalment la data del 14 de desembre del 1900 com la del naixement de la teoria dels quanta: és el dia en què Max Planck exposà una memòria «Sobre la teoria de la llei de la distribució d'energia de l'espectre normal», en la qual proposava la seva llei de radiació del cos negre, donava la densitat d'energia $U\nu$ per interval d'unitat de freqüència, feia intervenir una partició de l'energia dels resonadors segons quantitats discretes i introduïa la «constant universal h » de la qual donava el valor:

$$U\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/KT) - 1}, h = 6.55 \times 10^{-27} \text{ erg. sec.}$$

L'única manera de donar compte de les observacions de l'espectre de freqüències era considerar elements d'energia proporcionals a les freqüències: $\epsilon = h\nu$. En els seus primers treballs, Planck no va insistir sobre el fet que l'energia mitjana dels oscil·ladors d'una freqüència donada és un múltiple enter de la freqüència: per ell, i també pels altres físics de l'època, la introducció de la constant li semblava un procediment matemàtic sense significació física real. (De tota manera, no en públic sinó en privat, Planck sospitava que la seva descoberta «podia ser comparable a la de Newton».) Es tractava, doncs, com Planck ha escrit més tard, d'un «acte de desesperació», efectuat perquè «calia una explicació teòrica a qualsevol preu» dels fenòmens de radiació del cos negre que la teoria clàssica no aconseguia de subministrar de cap manera. Més tard, va intentar, durant força temps, de minimitzar la significació de h i tractà de retrobar aquesta constant a base de consideracions clàssiques. Presentà, a principi del 1912, a partir d'una «inconsistència lògica» en el seu treball del 1900 assenyalada per Einstein des del 1906, una modificació de la seva teoria: és la «segona teoria de Planck», en la qual l'absorció d'energia electromagnètica per oscil·ladors és descrita com un procés continu, i tan sols l'emissió és discontinua, i es fa per quanta enters d'energia sotmesos a lleis de probabilitat. I, el 1914, proposà una «tercera teoria» en la qual

l'emissió i l'absorció són totes dues processos continus, i els efectes quàntics estan causats per col·lisions de partícules atòmiques; però molt aviat es va demostrar que una tal hipòtesis era inacceptable. Tanmateix, a la «segona teoria», hom troba un dels primers suggeriments del caràcter probabilístic dels processos elementals en mecànica quàntica.

A més a més, la introducció de h podia aparèixer en aquell moment com una hipòtesi *ad hoc*, feta únicament per utilitzar en el cas de la radiació del cos negre. Tot i que fou ràpidament apuntalada per totes les experiències realitzades en aquest domini, la ubicació restringida de h en aquest únic fenomen en limitava singularment la potencialitat física i la significació profunda. Per aquestes raons, el naixement de la teoria dels quanta l'any 1900 fou, en cert sentit, molt modest, segons la seva vertadera naturalesa. No va ésser fins més tard (una vegada li fou reconeguda sense dubtes la irreductibilitat a la teoria clàssica de l'electromagnetisme i de la termodinàmica i realitzat l'abast general de les seves proposicions —la seva validesa en altres dominis—) que es convertí veritablement en la teoria dels quanta: la seva fecunditat es palesa, des de llavors, especialment per l'aplicació que en féu Bohr per a descriure l'estructura dels àtoms. Veurem com l'aportació d'Einstein fou decisiva en aquest passatge d'una hipòtesi-matemàtica d'aplicació limitada a una teoria física.

Però aquesta teoria no es convertí en una mecànica, és a dir, no va substituir realment les teories clàssiques, si no és a costa d'un renovament del marc conceptual de la física, marc del qual «l'antiga teoria dels quanta», tal com l'anomenem avui, gaudia (els càlculs quàntics en aquest marc es diuen «semiclàssics»): combinava aquest marc conceptual amb la consideració d'energia i d'accions discontinues. (Fou Sommerfeld qui constatà, el 1911, que les dimensions de h —una acció— no provenien simplement de l'atzar numèric, sinó que la seva significació física era realment la d'un quantum elemental d'acció). Aquesta segona etapa, que va fer néixer la mecànica quàntica, fou possible gràcies a la consideració de la dualitat de les ones i els corpuscles. Generalitzada per a tota partícula material per Louis de Broglie el 1923-1924, aquesta fou introduïda explícitament des del 1909 per Einstein per a la llum i per a la radiació electromagnètica. Però la seva arrel profunda es troba en una memòria de Planck que precedeix en alguns mesos la ja esmentada del desembre del 1900. Aquí tampoc Planck no va adonar-se de l'abast de la idea que introduïa, sota la forma d'allò que creia ésser tan sols una fórmula d'interpolació.

Informat dels darrers resultats experimentals relatius al cos negre, de Rubens i Kurlbau, sobre el comportament de la densitat d'energia, proporcional a la temperatura absoluta T per a les baixes freqüències i les grans temperatures, és a dir, el contrari a la llei de Wien (vàlida al contrari per a altes freqüències), Planck fou conduït a conciliar les dues fórmules:



Einstein al seu despatx de l'oficina de patents de Berna cap a l'any 1900.

$$\frac{\partial^2 S}{U^2} = \frac{\text{const}}{U^2} \quad \text{i} \quad \frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{const}}{U}$$

(on S és l'entropia i U l'energia mitjana d'un oscil·lador caracteritzat per una temperatura absoluta T i una freqüència). Havia deduït la primera fórmula del comportament a baixes freqüències i grans temperatures, de la qual la llei de Rayleigh-Jeans donava bon compte, i la segona de la llei de Wien. Planck proposà,

doncs, un compromís i suposà una forma $\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{a}{U(U+b)}$

És aquesta la fórmula d'interpolació que presentà el 19 d'octubre del 1900 a la Societat Alemanya de Física sota el següent i senzill títol: «Sobre el millorament de la llei de radiació de Wien», i que seguidament intentà de retrobar cercant un mecanisme per a la radiació del cos negre. La hipòtesi del quantum d'acció li va permetre de passar d'una llei molt empírica a una explicació més profunda, la necessitat d'introduir una forma combinatòria de les distribucions d'energia que comportava la discontinuïtat dels intercanvis elementals. Ara bé, retrospectivament, es veu que aquesta interpolació, de la manera en la qual Planck la justificà, equival a combinar els aspectes ondulatori i corpuscular de la radiació: conjuga, efectivament, una part purament electrodinàmica, basada sobre la teoria de Maxwell i que fa intervenir energies contínues, i una part purament estadística en la qual les energies es consideren discretes. Però d'això, Planck no se'n va adonar, i és Einstein qui, el 1906, féu notar la «inconsistència lògica» del seu raonament, i després, el 1909, reconegué la dualitat ona-corpúscle per a la llum. Des d'aquest punt de vista, hom pot veure, com Max Jammer, en la comunicació de Planck del 19 d'octubre de 1900, la presència «de certes implicacions que, una vegada reconegudes per Einstein, haviem d'afectar de manera decisiva els mateixos fonaments de la física», i considerar aquesta data com el veritable començament de la teoria dels quanta, donada la importància, per al seu desenvolupament futur, de la dualitat ona-corpúscle que hi trobem implícitament continguda per primera vegada.

Einstein, 1905. Quanta de llum i d'energia: punt de vista heurístic o embull teòric?

Fins a l'article d'Einstein del 1905 titulat *Sobre un punt de vista heurístic que concerneix la producció i la transformació de la llum*, els quanta d'energia tan sols es consideraven en relació amb els processos d'interacció entre la matèria i la radiació. La idea que la mateixa radiació pogués ésser quantificada era tan contrària a la teoria electromagnètica que, ja ho hem vist, Planck li cercà durant força temps alternatives, i en proposar aquesta hipòtesi, Einstein la presentà com un simple «punt de vista heurístic». El treball d'Einstein pot ésser considerat independent del de Planck, tot i que n'estava informat i que utilitzà la constant h de

Planck. Tal com Martin J. Klein ha escrit, «és més sorprenent allò que Planck no va fer en la seva teoria del cos negre que allò que hi féu»; per ell, l'origen de la dificultat que condueix a la hipòtesi quàntica es troba «en la distinció formal profunda entre les idees teòriques dels físics sobre els gasos i els altres cossos ponderables i la teoria de Maxwell dels processos electromagnètics en l'espai que podríem dir buit». En el seu article del 1905, Einstein es dedica, per la seva part, a cercar les propietats de la radiació que es puguin deduir de les aplicacions del segon principi de la termodinàmica i de la interpretació estadística.

Expressant el canvi d'entropia de la radiació del cos negre en funció del canvi de volum de V_0 a V, en el domini de validesa de la llei de Wien, és a dir, per a densitats baixes de radiació o per a les grans freqüències (cosa que correspon a valors elevats de ν/T), Einstein arribà a la fórmula:

$$S - S_0 = K \log \left(\frac{V}{V_0} \right)^{E\nu/\beta\nu K}$$

(on K és la constant de Boltzman i β el coeficient de la llei de Wien, fet explícit per Planck, aquest coeficient té el valor $\beta = \frac{h}{K}$). L'entropia de la radiació té, doncs, una forma logarítmica. Ara bé, aquesta forma és la mateixa que per a un gas ideal

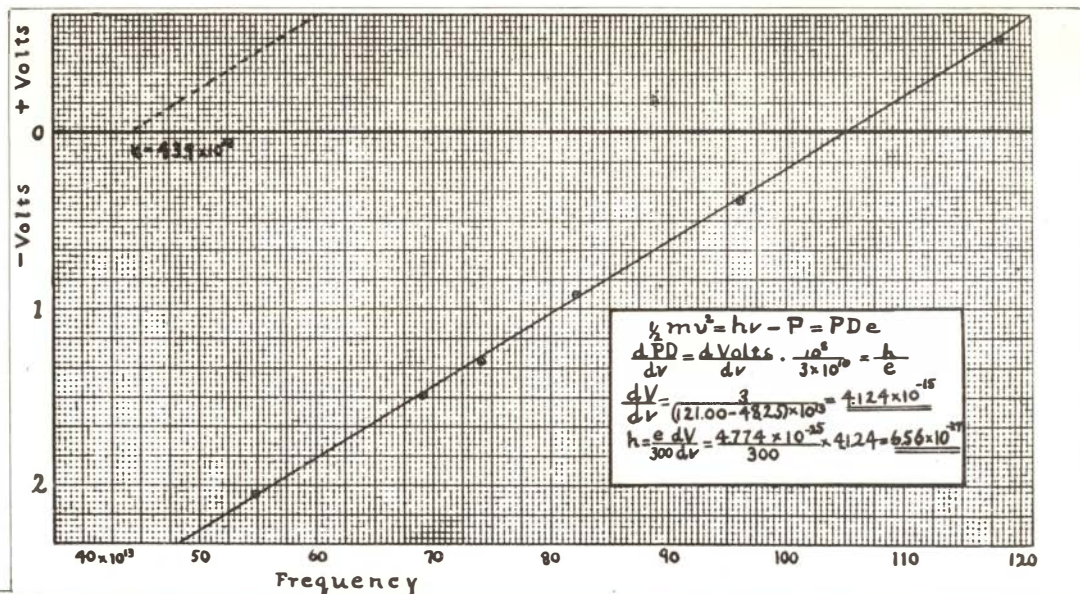
constituït de partícules. Efectivament, si $\left(\frac{V}{V_0} \right)^n$ és la probabilitat de trobar n partícules, en un instant qualsevol, en una part V del volum V_0 , la teoria cinètica dels gasos implica a través de l'equació fonamental de Boltzman entre l'entropia i la probabilitat ($S = K \log W$):

$$S - S_0 = K \log \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

Identificant les dues fórmules, Einstein en va deduir que $E\nu = nh\nu$, i va concloure que «la radiació monocromàtica de baixa densitat (...) es comporta com si estigués constituïda de quanta independents d'energia» de valor $h\nu$. (Els «quanta de llum» foren anomenats fotons el 1926 per G. N. Lawis a la revista anglesa «Nature».) Tot i que una tal proposició sembla estranya, ocasiona diverses conseqüències que estan d'acord amb les observacions experimentals: els fenòmens als quals Einstein aplicà aquest nou punt de vista foren la fotoluminescència (transformació d'una llum de freqüència determinada en una llum de freqüència diferent, regida per la llei de Stokes segons la qual la freqüència secundària no pot ésser superior a la freqüència incident), l'efecte fotoelèctric (emissió d'electrons per un metall sotmès a una radiació lluminosa) i la fotoionització (ionització d'un gas sotmès a una radiació ultraviolada o X). En aquests tres casos, les lleis observades no tenien explicació en termes de la

Verificació feta
per Millikan
de l'equació fotoelèctrica
d'Einstein

(Font: X.R.A.
Millikan:
The electron,
University
of Chicago Press.)



teoria clàssica: la hipòtesi dels «quanta de llum» en proporcionava una de particularment senzilla.

L'efecte fotoelèctric, descobert per Hertz l'any 1886 i independentment per Schuster i també per Arrhenius el 1887, va aportar seguidament les confirmacions més refermades de la teoria dels quanta de llum. (Val la pena de fer notar que les mateixes experiències de Hertz, que confirmaven la teoria de Maxwell i demostraven l'existència de les ones electromagnètiques, contenen el germen per a ésser qüestionades novament...) Nombrosos treballs experimentals, entre els quals se situen a primera fila els de P. Lenard (físic alemany nazi que esdevindria un adversari ferotge d'Einstein i la «física jueva»), acabaren per evidenciar la naturalesa *electrònica* de les partícules emeses, i després l'existència d'un *llindar* de freqüència i la *independència* de l'energia dels electrons respecte a la intensitat de la radiació incident. Aquests dos darrers caràcters eren impossibles de conciliar amb la teoria electromagnètica, però la teoria d'Einstein els explicava prou bé: cada quantum de llum es pot interaccionar amb un sol electró que pot ésser alliberat del metall mitjançant un cert treball P. El balanç energètic de la interacció comporta:

$$h\nu = P + \frac{1}{2}mv^2.$$

La mesura de les velocitats maximals dels fotoelectrons emesos per diversos metalls, efectuada el 1912, es demostrà en perfecte acord amb la teoria. Però la confirmació més forta fou obtinguda del 1914 al 1916 per R. Millikan, que mesurà el potencial de parada dels fotoelectrons (és a dir, el potencial necessari per a impedir-los d'arribar a una segona placa metàl·lica), i verificà directament la predicció d'Einstein segons la qual el potencial de parada hauria d'ésser «una funció lineal de la freqüència de la llum incident (...), amb el pendent independent de la naturalesa de la substància estudiada». Va obtenir així experimentalment la determinació de la constant de Planck, d'acord amb el valor avançat per aquest el 1900. Fou a partir d'aquesta confirmació de l'equació de l'efecte fotoelèctric proposada per Einstein que el quantum de llum i d'energia començà d'ésser efectivament considerat com una realitat física. No sense llargs dubtes, però, sobre els quals tornarem.

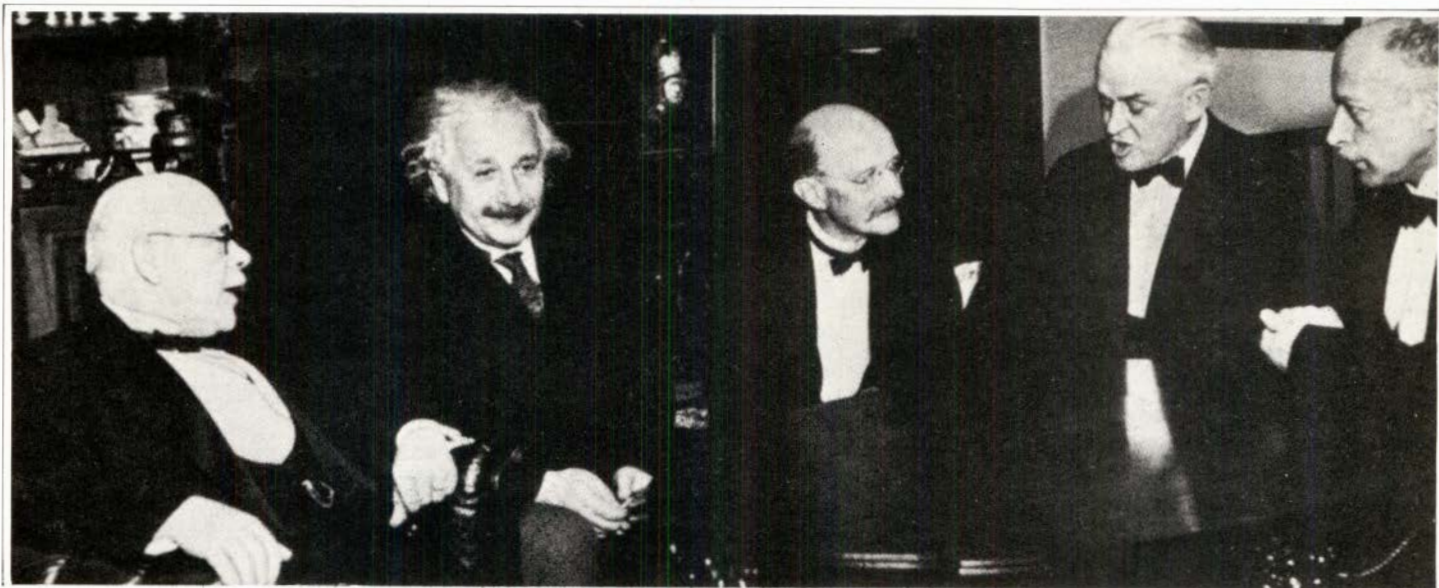
Cal subratllar que les prediccions d'Einstein relatives al potencial de parada de l'electró eren, tal com ha escrit justament M. J. Klein l'any 1979, quasi tan remarcables com la mateixa hipòtesi, en la mesura en què hom no sabia pràcticament res, el 1905, de la dependència de freqüències del potencial de parada per als fotoelectrons: deu anys foren necessaris per a confirmar-les experimentalment. Com sempre amb Einstein, l'experiència té respecte a la teoria una relació força rica en la coherència d'unes capacitats predictives que són a llarg termini i que, a fi de comptes, tenen molt poc a veure amb les dades immediates. En

relació amb aquestes, fou suficient per a Einstein partir d'un fet, inexplicat, en desacord amb totes les concepcions existents, cosa que li donava el caràcter exemplar de principi nou, o de defecte de principis existents, i concedir-li en realitat un abast molt més gran. No oblidem que en aquest mateix moment, Einstein considerava com «fets» vertaders principis que el conduïren a la teoria de la relativitat. Aquesta relació específica amb els fets experimentals no és per tant fonamentalment diferent, pel que fa a Einstein, en dominis tan diferents com la relativitat o els quanta encara balbucients: acontentem-nos de notar aquí aquest apropament i avançar ja la sospita que fins i tot per als quanta, generalment considerats com el domini en el qual s'exercia aleshores plenament l'activitat «empirista» d'Einstein, la seva preocupació anava essencialment cap a problemes teòrics de fons.

La construcció crítica de la teoria quàntica: la dualitat de les ones i dels corpuscles i la necessitat d'una recomposició teòrica

En un article del 1906, Einstein revelà, com s'ha dit més amunt, una inconsistència lògica en el raonament de Planck:

l'aplicació simultània d'una teoria (la de Maxwell), d'energia d'oscil·lacions contínues, i la d'un tractament estadístic, on aquesta mateixa energia es considera discreta. De fet, aquest aspecte discret de l'energia en Planck no era evident, puix que ell mateix s'ho amagava —als seus propis ulls—, com ja hem vist; cosa que permet dir que els quanta d'Einstein, el 1905, no són els mateixos que els de Planck. La independència conceptual de les dues hipòtesis està força ben resumida en aquesta fórmula d'A. Pais: «El 1900, Planck havia descobert la llei de radiació del cos negre sense utilitzar els quanta de llum. El 1905, Einstein descobria els quanta de llum sense utilitzar la llei de Planck» (utilitzant, evidentment, la constant de Planck). Però, el 1906, Einstein s'adona que en els estudis de Planck l'energia de la radiació també és discreta: que això està implícit en la derivació de la fórmula de Planck (conclusió que aquest últim va tardar molt d'acceptar). D'on la inconsistència lògica: si l'energia, fins i tot si ens mantenim en el cas del ressonador, tan sols pot ésser discontinua, aleshores, per Einstein, no es pot aplicar la teoria de Maxwell, àdhuc per al càlcul d'energies mitjanes. «La teoria de Planck —afegeix— ha de fer la hipòtesi que, tot i que la teoria de Maxwell dels ressonadors elementals no sigui aplicable, l'energia mitjana d'un tal ressonador, rodejat per la radiació, és igual a la que obtindríem amb un càlcul basat en la teoria de l'electricitat de Maxwell». I demostra, i ho va precisar el 1909, que aquesta condició no s'acompleix, ja que hi ha una part de l'espectre on la quantitat $\epsilon = h\nu$ no és petita en relació amb l'energia mitjana U. El que Einstein vol subratllar amb aquesta observació és essencialment que la hipòtesi dels quanta de Planck no pot escapar d'una reestructuració teòrica profunda: els quanta queden lluny d'ésser un



artifici sense significació física, tenen implicacions fonamentals. I si ell mateix hagués pogut considerar, el 1905, que els punts de vista continu i discontinu podien ser conciliats amb el recurs de les mitjanes, s'hauria adonat des d'aquell moment que les coses no eren tan senzilles, i que la necessitat d'una reestructuració considerable en matèria de teoria de radiació era indispensable. No és suficient suposar, tal com va fer Planck, que l'emissió i l'absorció de radiació es fan a base de múltiples de $h\nu$. És absolutament necessari suposar que *l'energia de radiació en si mateixa no pot existir si no és a base de múltiples de $h\nu$* , la qual cosa fou la hipòtesi d'Einstein del 1905.

Ho demostrà a partir d'una avaluació de les fluctuacions d'energia de radiació del cos negre. La mitjana del quadrat de la fluctuació d'energia, representat ϵ^{-2} , es presenta, en la hipòtesi quàntica, com una suma de dos termes la interpretació del quals és la següent: un d'ells és un terme d'interferències entre les ones parcials, i es correspon amb la teoria ondulatoria de la llum de Maxwell; l'altre correspon als quanta de llum que han d'ésser tractats estadísticament com a partícules en la teoria cinètica, i tot ocorre, doncs, sota aquest aspecte, com si la llum fos de naturalesa corpuscular. Aquell mateix any, el 1909, Einstein proposà un assaig de representació del corpuscle lluminós com una singularitat en l'espai lligada a un camp de forces, la superposició de les quals assegura el caràcter ondulatori: cosa que era una manera de recollir la teoria dels accessos de Newton; i de reconciliar la naturalesa ondulatoria de la llum amb l'estructura quàntica; o com a mínim, com ell va dir explícitament, demostrar que les dues no són incompatibles (de tota manera caldria

esperar el 1916 perquè Einstein enuncii la llei $p = \frac{h}{\lambda}$). Però

aquesta temptativa no semblà molt convincent, i el seu autor manifestà a continuació dubtes respecte a una interpretació tan cruament corpuscular. Sigui com sigui, Einstein anuncià «una nova fase del desenvolupament de la física teòrica, que veurà produir una teoria de la llum com una mena de fusió entre les teories ondulatories i les teories de l'emissió» (corpuscular)... Una tal preocupació —conciliar els aspectes ondulatoris i corpusculars— havia esdevingut necessària en aquell temps. La hipòtesi dels quanta encara era rebutjada generalment —àdhuc per Sommerfeld el 1911, o per Lorentz— a causa de la seva contradicció amb la teoria de Maxwell, però també a causa del caràcter parcial de les explicacions a base de quanta, i de l'absència de significat dinàmic de la constant h , que semblava força arbitrària: aquesta significació només li seria atorgada per la dualitat onacorpúscle. M. Jammer recorda, com a il·lustració de les dificultats per a imposar-se que va trobar la hipòtesi dels quanta de llum, la carta dirigida el 1913 per Planck, Warburg, Nernst i Rubens al ministre alemany d'Educació, reproduïda al llibre de Max Jammer, per proposar Einstein per a un lloc a l'Acadèmia

de les Ciències Prussiana, lloc deixat vacant pel decés de J. H. Van't Hoff: «Hom trobaria difícilment un sol problema de gran envergadura, dels quals la física moderna és tan rica, al qual Einstein no hagi aportat una contribució important. Hom no pot reprotxar-li haver errat el tret de vegades en el curs de les seves especulacions, com és el cas, per exemple, de la hipòtesi dels quanta de llum; puix que no és possible d'introduir idees fonamentalment noves, fins i tot en les ciències més exactes, sense prendre de tant en tant alguns riscos». (Fou per aquesta mateixa hipòtesi dels quanta de llum que va rebre el premi Nobel vuit anys més tard!)

La hipòtesi d'Einstein diferia clarament, doncs, de la de Planck —que fou, al contrari, generalment acceptada, com a mínim a partir del 1911—, tot i que ambdues tinguin en comú la fórmula $E = h\nu$. Planck proposava tan sols una hipòtesi sobre la interacció entre la radiació i la matèria, mentre que Einstein donava un model «corpuscular» («una interpretació atomística», deia Planck) de la radiació, que comportava una contradicció amb la teoria de Maxwell.

Més que un «realisme corpuscular» —el qual era, en tot cas, molt matisat (hi mancava la consideració de la impulsió, i els càlculs d'Einstein tenien en compte essencialment consideracions sobre fluctuacions, no sobre interaccions de corpuscles)—, hi havia en el cor de la seva hipòtesi dels quanta de llum l'exigència d'una reestructuració teòrica profunda. És això el que proporciona la diferència radical entre les seves concepcions i les de Planck. Aquí s'imposa un altre apropament a l'elaboració de la teoria de la relativitat: la seva hipòtesi és, per Einstein, l'únic mitjà de restablir la *simetria* entre l'emissió i l'absorció de la radiació que la teoria ondulatoria de Maxwell infringia, però que li semblava experimentalment provada. Aquest argument sobre la necessitat d'eliminar una dissimetria recorda, efectivament, aquell amb el qual començà l'article del 1905 sobre la relativitat restringida.

L'extensió del domini de validesa dels quanta: el problema de les calors específiques

Aquesta reestructuració teòrica, que ell entreveia, la concebé sobre una base molt més àmplia que la dels fenòmens de radiació. Observà que els moviments moleculars, que s'havien cregut fins aleshores sotmesos a les lleis «dels moviments dels cossos que percebem directament», són tals que «el conjunt d'estats possibles (de ions en vibració) és més restringit que per als cossos dels quals tenim directament la percepció»: és, diu, la mateixa teoria cinètico-molecular la que cal modificar, i no únicament la de la calor i la radiació. Einstein es refereix, en el seu article del 1907 sobre la teoria de les calors específiques, a aquesta extensió del que cal qüestionar en relació amb la validesa de les

Nernst, Einstein, Planck, Millikan i Laue a Berlín, el 1931. Eren cinc pilars de la física de l'àtom.



Primer Congrés Solvay (1911).
Asseguts, d'esquerra a dreta: Nernst, Brillouin, l'industrial Ernest Solvay, Lorentz, Warburg, Perrin, Wilhelm Wien, madame Curie, Poincaré. Drets d'esquerra a dreta: Goldschmidt, Planck, Rubens, Sommerfeld, Lindemann, Maurice de Broglie, Knudsen, Hasenöhrl, Hostelet, Herzen, Jeans, Rutherford, Kamerlingh-Onnes, Einstein, Langevin.

(ciència 3

octubre 1980 / 151) 25

concepcions clàssiques. «Si la teoria de la radiació de Planck —escriu— toca vertaderament alguna cosa fonamental, cal esperar que, en altres dominis diferents de la teoria de la calor, hi hagi també contradiccions entre la teoria cinètico-molecular actual i l'experiència, i que puguin ésser resoltes amb el mètode proposat». Així, el problema de les calors específiques dels sòlids fou escollit per Einstein per aplicar la hipòtesi quàntica. La llei de Dulong i Petit (1819) (segons la qual la calor específica és la mateixa per a tots els àtoms dels cossos simples i no varia amb la temperatura, és a dir, val per a temperatures mitjanes o altes) era defectuosa per als elements lleugers, i s'havia vist sistemàticament contradita per les experiències des que fou possible d'obtenir baixes temperatures (a partir del 1872 i sobretot cap a final del segle XIX). Ara bé, aquesta llei rebia la seva explicació natural en la física clàssica, la qual no podia, en canvi, donar compte del decreixement de les calors específiques amb el de la temperatura, de tal manera que semblava que ambdues havien d'anul·lar-se en el zero absolut.

Per Einstein, es tractava aquí d'una insuficiència del teorema de l'equipartició de l'energia. Estudià el fenomen en termes d'oscil·lacions harmòniques, suposant que els àtoms independents els uns dels altres oscil·len a la mateixa freqüència. Obtingué així l'energia per mol, i, per tant, la calor específica $\left(\frac{dU}{dT}\right)$, que presenta el comportament observat (la comparà amb les dades relatives al diamant): les calors específiques de tots els sòlids cristallins s'anul·len en acostar-se al zero absolut de temperatura. Per altra banda, la llei de Dulong i Petit es retroba com un límit per a temperatures elevades, tal com s'ho havia proposat al principi de l'article. (La simplificació que consistia a considerar la hipòtesi d'una mateixa freqüència d'oscil·lació atòmica es va modificar poc després, però aquesta precisió no canvia en res l'essència de l'explicació.)

Aquesta extensió del domini d'aplicació de la teoria dels quanta fou determinada per a la seva acceptació. Fou l'origen de l'adhesió de Nernst —que treballava experimentalment sobre les calors específiques i comprovà que lligaven amb la fórmula d'Einstein— i, probablement mitjançant aquest, de l'organització dels Congressos Solvay, els quals es demostrarien tan importants per al desenvolupament de la física quàntica. Més que d'una simple extensió, es tracta, de fet, d'una veritable demolició d'un punt de vista: els fenòmens de radiació es desprendran d'aquí en endavant de la teoria de vibracions atòmiques, cosa que constitueix innegablement una simplificació de la situació teòrica, i **l'acosten a una perspectiva fonamental.**

El 1911, Einstein tragué una altra conseqüència inesperada de la teoria dels quanta sobre les propietats de la matèria: mostrà, a partir d'un suggeriment de Madelung i Sutherland, la relació que existeix entre la compressibilitat d'un cristall i la seva fre-

qüència d'absorció òptica, i, per tant, la seva calor específica. Aquesta relació, susceptible d'ésser comprovada experimentalment, va ésser-ho aviat per Nernst, i les mesures en el cas de l'argent mostraren un excel·lent acord amb la fórmula trobada per Einstein (donada en el seu article sobre «les relacions entre el comportament elàstic i la calor específica dels cossos sòlids de molècules monoatòmiques»). Hom es pot preguntar, amb Max Jammer, si la teoria quàntica no s'hagués pogut desenvolupar, a partir de l'estudi de les calors específiques, amb menys dificultats conceptuals. La lentitud dels esdeveniments fou deguda a la

prioritat històrica de l'estudi de la radiació.

No fou fins al Congrés Solvay del 1911 que la hipòtesi quàntica es va realment prendre seriosament. Planck acceptava renunciar a una interpretació clàssica de h i posar en dubte l'absoluta validesa de la mecànica clàssica. Einstein hi presentà un treball sobre «l'estat actual del problema de les calors específiques». Sommerfeld proposà una interpretació de h en termes d'acció, la qual cosa contribuïa a fer-ne realment un concepte físic, i no tan sols una simple constant numèrica, i precedia l'elaboració d'una nova mecànica; Poincaré, que no s'havia acostat realment als problemes de la radiació i la teoria dels quanta sinó des de feia molt poc de temps, i sobretot en ocasió de les discussions del congrés, demostrà, alguns dies després, que era impossible no considerar la discontinuïtat en els fenòmens de radiació si hom volia arribar a quantitats finites, i que la hipòtesi dels quanta s'imposava de manera absoluta. Concloïa: «La hipòtesi dels quanta és l'única que condueix a la llei de Planck». Ben mirat, ja el 1903, Einstein havia establert, a partir de la seva fórmula de fluctuació on apareixien dos termes independents dels quals ja hem parlat abans, que no era possible d'economitzar la hipòtesi dels quanta i reemplaçar-la per una condició més conforme amb les concepcions clàssiques; tal com escriu M. J. Klein, «mentre que Planck havia introduït la quantificació com una condició *suficient* per a establir la seva distribució, Einstein raonava que era una conseqüència *necessària*». A més a més, just abans de la reunió Solvay, Ehrenfest acabava de demostrar que els quanta eren necessaris per tal d'evitar la «catàstrofe ultraviolada» de la llei de Rayleigh-Jeans; el seu treball fou ignorat, però, durant les discussions del congrés. Va caldre l'autoritat de Poincaré per tal de fer acceptar la idea...

En resum, la hipòtesi dels quanta que s'acceptà d'aquesta manera i de llavors en endavant, fou la de Planck, és a dir, relativa als fenòmens d'emissió i d'absorció. La d'Einstein, és a dir, la quantificació de l'energia de la mateixa radiació, tardaria més temps a ésser-ho: puix que era difícilment concebible que la radiació tinguí a la vegada propietats ondulatòries i corpusculars. Millikan mateix, que va mesurar el potencial de parada dels fotoelectrons i va comprovar de manera molt exacta la predicció feta per Einstein el 1906, va pensar força temps que si la fórmu-



Una classe d'Einstein a Princeton (EUA).

la proposada era correcta, la forma tal com havia estat introduïda era com a mínim sospitosa. «He passat deu anys de la meua vida —va escriure— provant aquesta equació d'Einstein del 1905 i, contràriament a tot el que jo esperava, em va caldre reconèixer, el 1915, que es verificava sense cap ambigüitat, malgrat el seu caràcter poc raonable, puix que semblava violar tot allò que sabíem de les interferències de la llum».

Tot i que no tenia explicacions per a proposar, Einstein acceptà, des del 1909, aquesta aparent contradicció en el comportament de la radiació entre l'aspecte ondulatori i l'aspecte corpuscular: ens quedarà per a avaluar el que significava conceptualment per ell. S'ha pogut entreveure, amb tot el que hem exposat, que allò que interessà fonamentalment Einstein fou la base teòrica —desconeguda— de tots aquests fenòmens, de la qual esperava la solució de les contradiccions aparents. Després del 1911, li semblà difícil d'avançar en aquesta direcció: no veia com podia abordar el problema d'una manera global; de fet, entre el 1911 i el 1916, Einstein no donà pràcticament més contribucions en el domini de la radiació i dels quanta. Quan Bohr va finalitzar els seus treballs —durant aquest període, precisament— sobre la quantificació dels nivells d'energia dels àtoms, Einstein va tenir la possibilitat d'aconseguir un darrer avenç decisiu, efectuant, en el seu famós article del 1917, una síntesi magistral de la física dels quanta i de la radiació, reduïda als seus conceptes i principis fonamentals, a partir dels quals derivaria la llei de Planck del 1900. Aquest resultat adquireix, sota la llum del procés aquí esbossat, tota la seva significació pel que fa a l'objectiu que tenia Einstein en qüestions de teoria física i en el ritme que li era propi.

(Michel Paty)

Materials de lectura

- Max Jammer: *The conceptual development of quantum mechanics*, Nova York, McGraw Hill, 1966.
- A. P. French (editor): *Einstein, le livre du centenaire*, París, Hier et Demain, 1979 (edició original anglesa: Londres, Heinemann Educational Books, 1979).
- Thomas Khun: *Black-body theory and the quantum discontinuity (1894-1912)*, Nova York, Oxford University Press, 1978 (versió castellana a Madrid, Alianza Universidad, 1980).
- Martin J. Klein: «Einstein et le développement de la physique quantique», dins A. P. French (editor): *Einstein, le livre du centenaire*.
- Paul Arthur Schilpp (editor): *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, Evanston, The Library of Living Philosophers, 1949.
- Niels Bohr: *Física atòmica i coneixement humà*, Barcelona, Ed. 62, 1968.
- Max Born-Albert Einstein: *Correspondència*, Siglo XXI.

Glossari

calor específica: energia que cal subministrar a la unitat de massa d'una substància perquè la seva temperatura s'elevi un grau. Es considera, al més sovint, la calor específica a volum constant o bé a pressió constant.

congressos Solvay: sota la iniciativa del físic i químic alemany Walter Nernst, l'industrial belga Ernest Solvay acollí els millors científics del món, a partir del 1911, en reunions més o menys bianuals. Aquestes foren decisives per al desenvolupament de la teoria quàntica.

cos negre: sistema físic que emet radiacions dependent únicament de la temperatura i no de les seves propietats físiques o químiques. Els objectes negres, és a dir, els que absorbeixen tots els colors de la llum, tenen aquesta propietat. També ho és una cavitat tancada de parets perfectament reflectores, aïllada tèrmicament de l'exterior.

èter: medi hipotètic que ompliria tot l'univers, introduït per Newton per explicar les interaccions, salvant així el problema de l'acció a distància. Fou també el sosteniment de les ones electromagnètiques. La teoria de la relativitat fa innecessària l'existència de l'èter.

freqüència: en una magnitud periòdica, nombre d'oscil·lacions completes per segon. El seu valor, en una vibració ondulatoria, es calcula com el quocient de la velocitat de propagació de l'ona i la longitud d'ona.

gravitació: interacció entre els cossos deguda a la seva massa. La teoria clàssica fou deguda a Newton mentre que Einstein la modificà radicalment en la seva teoria general de la relativitat.

lleis de Maxwell o electromagnetisme clàssic: conjunt d'equacions i la teoria consegüent que explica les interaccions degudes a la càrrega elèctrica o al magnetisme dels cossos materials. La teoria de la relativitat donà una nova visió d'aquesta teoria.

partícula o corpuscle: sistema físic capaç de col·lidir. S'oposa a ona

radiació: ona o corpuscle en moviment. Originàriament s'aplicava únicament a propagacions ondulatories. Les radiacions, segons l'energia, poden ser: tèrmica, lluminosa, radiació alfa, beta, gamma, X, ...

ressonador: sistema físic capaç de vibrar i arribar a la ressonància. Els ressonadors de Planck eren suposats electrons situats en una cavitat que podrien absorbir i emetre radiacions.

sistema inercial o d'inèrcia: aquell sistema no sotmès a forces exteriors.

teoria cinètico-molecular dels gasos: teoria que parteix de la hipòtesi que els gasos estan compostos de corpuscles (molècules); les relacions mecàniques entre ells serveixen per a calcular el comportament macroscòpic dels gasos, és a dir, pressió, temperatura, energia, calor específica, ... El tractament utilitzat és l'estadística.