

EL PROFESSOR MAX PLANCK I LA TEORIA DELS QUANTA

PER a tots aquells que, de prop o de lluny, segueixen els grans progressos de la física moderna, el nom de PLANCK no els és pas desconegut. Amb ocasió d'haver-li estat concedida la Medalla Franklin per l'institut del mateix nom, ens plau de portar a les planes de CIENCIA el nom d'aquest gran físic, tot oferint als nostres lectors un dels més interessants aspectes de la seva activitat científica.

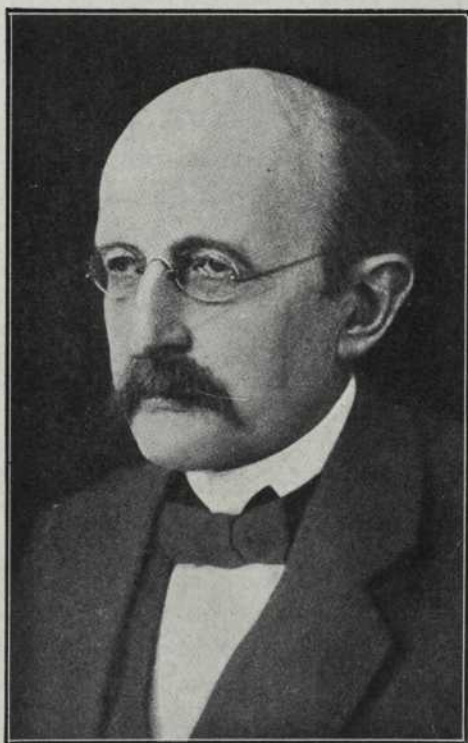
El professor Max PLANCK, de la Universitat de Berlín, fou nat a Kiel el 23 d'abril de 1858. Estudià a les Universitats de Munich i de Berlín i en 1879 rebé el grau de Doctor en Filosofia a Munich. Ací romangué com a professor privat fins 1885, en el qual any li fou atorgada la càtedra de física a Kiel. En 1889, esdevingué professor de física matemàtica i director de l'Institut de física teòrica a Berlín. En 1913-1914, fou rector de la Universitat de Berlín i en 1920 rebé el Premi Nobel per les seves remarcables investigacions físiques.

El Dr. PLANCK es dedicà per vocació a l'estudi de la física teòrica i particularment a la termodinàmica. Guanyà fama internacional amb la seva llei de la radiació, proposada en 1901, la qual assegura que la radiació és emesa i absorbida en múltiples integrals d'una certa quantitat indivisible d'energia, que depèn solament de la freqüència de la radiació. En el desenvolupament de la llei de la radiació, ell emprà, per primera volta, la revolucionària idea de la indivisible quantitat fonamental d'energia radiant nomenada *quantum*.

Amb el desig de fer-lo més clar als que desconeixen les idees bàsiques en què recolzen les teories del prof. PLANCK, ens permetem de fer precedir el seu article d'aquestes breus notes, que resumeixen les seves genials investigacions.

És sabut que les molècules de tot fluid contingut en un recinte es mouen amb tanta més força a mida que la temperatura és més elevada, essent per mitjà d'aquesta agitació que la temperatura es trameta a tota la massa, de forma que el grau de l'agitació dóna una mesura de la temperatura una vegada l'equilibri és establert. Però aquest equilibri no té pas solament lloc en el cas d'un fluid qualsevol: l'experiència demostra que un termòmetre introduït en un recinte *opac*—és a dir, a l'interior del qual cap influència tèrmica no pot exercir-se per radiació a través de les seves parets—envoltat

d'aigua bullent, arriba a fixar la indicació de la seva temperatura, sigui el que sigui el punt interior de l'esmentat recinte en què és aplicat, tant si aquest conté un fluid qualsevol, com si és rígorosament buit, i això amb independència absoluta de la forma geomètrica i de la substància de què és constituït. L'acció soferta pel termòmetre és, en aquest darrer cas, tramesa



El professor MAX PLANCK, de la Universitat de Berlín, autor de la *teoria dels quanta*, que ha estat honorat amb la medalla Franklin.

solament per radiació a partir dels diversos punts del recinte, i l'equilibri es manté pel fet que el termòmetre—o qualsevol altre que sigui el cos—radia constantment energia a partir de la seva superfície vers l'espai limitat pel recinte i absorbeix així mateix energia d'aquest espai, en quantitats iguals.

Aquesta radiació es fa o no visible segons quina sigui la temperatura del recinte, la qual pot variar entre grans límits; però vegi's o no, això en res no afecta el caràcter lumínic de la radiació, que es tramet a través del buit absolut a la velocitat de 300.000 km per segon.

Això porta com a conseqüència que tota cavitat completament enclosa en la matèria de temperatura uniforme és plena de llum en equilibri estadístic, és a dir, que es manté en un estat estacionari. D'aquesta uniformitat prové que calgui atribuir una mateixa valor per a la *quantitat d'ener-*

gia, o densitat W , de la llum, continguda en un volum determinat qualsevol del recinte.

Aquesta densitat W pot ésser coneguda practicant una molt petita obertura en la paret limitadora del recinte i estudiant la radiació que se n'escapa. Aquesta radiació, que per les definicions precedents es troba en equilibri termodinàmic amb la matèria a la temperatura T és anomenada *radiació integral* o *radiació negra* a la temperatura T i el sistema emissor *cos negre*.

La definició *cos negre* pot explicar-se per les consideracions següents: Si—continuant l'exemple del forn—volguéssim analitzar l'interior a través de l'obertura, cap detall no ens fóra visible de la mateixa manera que el nivell del metall fos en un gresol incandescent no és, tampoc, apreciat a través d'un petit orifici; hom rebria, solament, la sensació d'ésser abocat a un abim lluminós, absent de detalls. Si ara dirigim un raig lluminós a través de l'orifici vers l'interior, res no hi guanyarem, car les reflexions successives que experimentarà privaran la sortida de l'esmentat raig a través de la mateixa obertura. I ja sabem que la definició de *cos negre* és, precisament, l'absorció, sense retornar-la, de tota llum que rep.

La intensitat de la *radiació negra* és, segons la llei de STEFAN, proporcional a la quarta potència de la temperatura absoluta

$$E = \sigma T^4$$

és a dir, que creix extraordinàriament a mida que augmenta la temperatura. La validitat d'aquesta fórmula ha estat demostrada experimentalment per a totes les temperatures, des de la de l'aire líquid fins a la de la fusió del ferro.

La vella mecànica newtoniana, que fins a darreries del segle passat havia explicat satisfactòriament els més complicats problemes de la física teòrica, no assolí a donar compte de l'espectre d'aquesta radiació, per tal de derivar-ne les seves lleis. Totes les temptatives de trobar una fórmula que, emmotllada a les lleis de la mecànica clàssica, expliqués el fenomen de l'equipartició de l'energia de la *radiació negra*, fracassaren. Solament PLANCK, l'any 1901, en una memòria publicada a *Annalen der Physik*, exposà una solució satisfactòria, anunciant la seva cèlebre *teoria dels quanta* i donant, d'acord amb ella, la fórmula que satisfecia del tot les exigències de l'emissió de la radiació del *cos negre*, i que fixa per a cada temperatura la seva composició.

PLANCK arribà a demostrar, partint d'aquesta fórmula, la no validesa

d'un dels principis fonamentals de la mecànica clàssica: el de la continuïtat de l'energia. Fins aleshores, únicament la matèria i l'electricitat eren considerades com a entitats discontinües o formades per partícules; en canvi, hom no concebia un terme inferior per a la quantitat d'energia que un àtom o un electron eren capaços d'absorbir o emetre. És a dir, PLANCK en la seva hipòtesi parteix del principi que l'energia *emesa* per un electron o un àtom oscil·lant és radiada per unitats distintes, *graus d'energia*, que ell anomena *quantums*. Aquesta unitat no és igual per a tots els oscil·ladors, si no que depèn de la freqüència ν de llurs oscil·lacions i ve donada per la fórmula

$$\varepsilon = h.\nu$$

en què h és la *constant universal de PLANCK* $= 6,5 \times 10^{-27}$ *ergs-segon*.

Direm: "*Quan l'energia radiant és en equilibri de temperatura amb la matèria, l'energia radiant total per unitat de volum és finita, no infinita*", definició del tot incompatible amb la mecànica newtoniana.

La nova hipòtesi obrí un ample camp a l'especulació científica i filosòfica. El pensament d'homes eminents, unint-se al de PLANCK, anà completant la llei inicial per noves addicions, tendència natural a la generalització de la teoria. Allà on la mecànica estadística clàssica havia fracassat, els *quantums* assoliren explicar fenòmens que, comprovats experimentalment, no havien rebut encara una definició teòrica satisfactòria. Aquest èxit s'ha posat de manifest en aplicar els *quantums* a la teoria dels calors específics dels sòlids, a les lleis de la conductivitat elèctrica, a la teoria cinètica dels gasos, en fotoelectricitat... I tot convida a creure que la introducció d'aquestes teories a les lleis de la física i de la química ajudaran eficaçment a la comprensió de fenòmens i idees que avui se'ns presenten, encara, embolcallats del més absolut misteri.

L'article de PLANCK que ací reproduïm es refereix als anomenats *quantums-de-llum*. Això representa un nou i interessant aspecte de les seves teories quantistes encetat per EINSTEIN, qui suposà que la mateixa radiació, àdhuc en absència de tot medi material, posseeix estructura quantista, de tal manera, *que una onda lluminosa, per exemple, estaria formada per un nombre finit de quantums-d'energia, cada un dels quals constituiria una individualitat indivisible, en el sentit de què no podria ésser absorbit ni emès parcialment*.

Aquesta concepció d'EINSTEIN, que ha estat fortament discutida, rep una ampla valoració amb el treball de PLANCK que a continuació ens honorem a reproduir.

LA REALITAT FÍSICA DEL QUANTUM-DE-LLUM ¹

pel Dr. Max PLANCK

Journal of the Franklin Institute., Juliol 1927

Amb gran sentiment he estat obligat, per deures ineludibles, a no rebre en persona l'alt honor que l'Institut Franklin m'ha atorgat. És per això que he demanat permís per redactar—com a mostra de la meua gratitud—una curta comunicació sobre la qüestió científica que al present ocupa el primer pla en interès.

Tots coneixeu que la física teòrica, el desenvolupament i progrés de la qual data essencialment de dos cents anys, i que fa una generació semblava pròxima a abastar la seva conclusió final, entra ara a un període crític, ple de serioses conseqüències. I no és que hom hagi dubtat dels seus principis generals. Les seves lleis més generals i alhora més simples, tals com el Principi de Conservació de l'Energia, les Lleis de la Termodinàmica i les Equacions Fonamentals del Camp Electromagnètic, són, justament, les que han resistit amb èxit les més severes proves i serveixen ara com a guia per a exploracions més amples. Seria completament incorrecte de parlar d'una fallida de la ciència. És la nostra representació mental dels successos, dels principis dels quals cerca explicació, el què ens ha menat recentment a la confusió. Alguns conceptes que serien comptats entre els més simples i més evidents en el món, han resultat ésser obscurs, dubtosos, sovint contradictoris; i és evident que en alguns aspectes nosaltres hem de construir conjuntament damunt molts principis, si no volem perdre de vista l'assumpció més important de la recerca física: la compatibilitat de diverses lleis entre elles.

Per exemple: cap fet de la natura no apareix més simple i més obvi, tant al llec com a l'investigador, que el moviment d'un cos material, una esfera per exemple; i a aquesta simplicitat d'idees correspon completament la simplicitat de les lleis que més tard han estat reconegudes com governant el moviment. No és cap miracle que l'home de totes les edats, àdhuc del temps dels filòsofs grecs, hagi tractat de reduir tots els fets físics a moviments dels cossos materials, i que fos després confirmat completament en aquest esforç, per l'èxit de les brillants descobertes de GALILEU, KEPLER i NEWTON.

Avui sabem amb certitud que les lleis de la mecànica posseeixen solament una valor aproximada. No em refereixo ara a l'esmena aportada per la Teoria de la Relativitat. Per bé que aquesta teoria ha afectat fonamentalment el nostre punt de vista, mai no pressuposa en últim anàlisi una complicació, sinó, al contrari, una simplificació i un refinament de la mecànica clàssica. El que ara considerem ha de fer-se amb quelcom d'enterament diferent, quelcom de més revolucionari. És a dir, l'experiència ens ha obligat a reconèixer la inevitable conclusió que no solament no són fonamentals les lleis de la mecànica, sinó que sempre el concepte bàsic de mecànica, la partícula material, sota les circumstàncies de moviment rigorosament curvilini, perd immediatament el seu significat. Quan una partícula, un electron, per exemple, es mou en el seu camí, res no es treuria en demanar la posició definitiva que ocuparà en un temps definit. Com més rigoroses siguin les corbes, més confosa esdevé la posició de l'electron. És a dir, aquesta esdevé indefinida i es propaga a l'espai circumdat, tal com un raig de llum quan colpejant la vora d'una pantalla, en lloc de continuar enllà com a una unitat, es doblega i s'espargeix en totes direccions. Si

¹ Treball compost en ocasió de rebre la Medalla Francklin en maig de 1927.

el camí de l'electron és periòdic o quasi periòdic i si s'extén sobre una molt petita quantitat d'espai, com en el model de l'àtom de BOHR, en el qual, en cada instant, l'electron es propaga sobre son camí complet, el seu moviment s'assembla més aviat a les vibracions d'una onda estacionària en un medi continu que no pas a les d'una partícula oscil·lant.

D'aquesta manera, la mecànica corpuscular es resol en una mecànica ondulatòria, el principi de la qual, en tots els seus detalls, no ha estat de cap manera completament investigat. No obstant, i gràcies a les idees introduïdes a la ciència per L. de BROGLIE i E. SCHROEDINGER, aquests principis han establert una fundació sòlida. Hem de posar-li confiança, si més no, perquè llurs conseqüències concorden completament amb els postulats que havien estat introduïts molt abans en la mecànica del quantum per W. HEISENBERG, solament sobre la base dels fets de l'experiència.

Tot i que aquesta forma ofereix, almenys, una perspectiva per atènyer gradualment una percepció més profunda en la veritable natura de l'energia mecànica, encara el camí vers una comprensió de la natura de l'energia de la radiació electromagnètica sembla, al present, completament tancat. Nosaltres havem experimentat en cert sentit un desenvolupament justament oposat al del moviment corpuscular. Mentre els quants corpusculars, com havem vist, es difonen en l'espai i es resolten en forma ondulatòria, sembla, pel contrari, que l'energia radiant, movent-se en el buit absolut amb la velocitat de la llum, en altes freqüències es contrau i concentra en punts separats, que es mouen talment com corpuscles i que, per aquesta raó, són nomenats *quants-de-llum*.

A primera vista, aquest últim estat de la qüestió apareix molt més incompreensible que l'anterior, pel fet que en els moviments corpusculars havem operat amb matèria o amb càrregues elèctriques i aquestes, segurament, encara amaguen dintre d'elles mateixes molt del misteri, amb el qual pot estar associat algun enigma, que únicament podrà explicar-se quan haurem aixecat el vel del misteri. Respecte a les lleis de la propagació de l'energia radiant en el buit absolut, tenim el dret d'esguardar-les com a conegudes en tots llurs detalls des del brillant èxit de la teoria de MAXWELL. El buit absolut tal vegada no amaga en ell cap misteri, cap matèria, cap càrrega. Serveix solament com a veïcle del camp magnètic. I les lleis d'aquest camp són representades, amb una integritat i exactitud que aguanten a tort i a dret els finíssims mesuraments d'interferències, per equacions a les quals és completament estranya una concentració d'energia en quants. El quantum d'acció elemental no pren cap part en les equacions de MAXWELL. Pel fet de la seva dimensió, seria completament impossible introduir aquesta quantitat en les equacions de MAXWELL, si no hi apareixien constants addicionals.

Justament en aquest punt, quan les condicions semblen ésser les més simples, i quan, d'acord a totes les experiències prèvies, tenim la certesa d'arribar nosaltres mateixos, imminentment, a una comprensió final de la Natura, som desconcertats per un misteri completament inesperat. Moltes vegades sorgeix la pregunta: devem realment atribuir als quants-de-llum una realitat física, o tal vegada són un camí de compte atractiu que preserva la validitat de l'electrodinàmica clàssica de MAXWELL?

Diversos han estat els esforços per respondre aquesta pregunta i encara sorgeix l'argument ara i adés. Fem ara una lleu consideració a la pregunta.

Per començar, és evident que només pot ésser encaçada una decisió per la més

extremada atenció dels fets experimentals. Donat que mai no podem mesurar el camp magnètic en ell mateix, sinó solament pels seus efectes sobre la matèria, ço que es fa sobre els instruments de mesura, semblaria permès, a primera vista, de limitar la significança de quantum-de-llum solament a la interacció entre la radiació i la matèria, ço és, el procés de l'emissió i de l'absorció, i, per altra part, negar llur existència en la propagació en el buit absolut. Per tant, caldria conservar totes les lleis clàssiques de la radiació de l'energia en el buit.

Però una consideració més tancada ens mostrarà que aquest camí no ens mena enlloc, si nosaltres mantenim immutables els principis fonamentals de la física. Primer de tot, és fora de dubte que cal atribuir una realitat física a l'energia radiant en el buit, com a tal. Això es dedueix de la primera llei de la termodinàmica, el principi de l'energia, en la seva aplicació a l'emissió i absorció de l'energia radiant. Però no solament un raig de radiació posseeix una energia definida d'acord a la primera llei, sinó també una entropia definida d'acord amb la segona llei: el principi de l'increment d'entropia. Per tant, si l'entropia no fos present, no creixeria. Som, doncs, obligats a atribuir a l'entropia, igual que a la matèria, una existència independent, sense referir-la a qualsevol substància. Aquesta conclusió no és afectada en cap manera pel fet que, posats a determinar la quantitat d'entropia, podem mesurar la temperatura d'un cos material que està en equilibri amb l'energia radiant.

Si ara conservem també la relació entre entropia i probabilitat introduïda per L. BOLZMANN—i sense això sembla impossible una comprensió del contingut de la segona llei—hom infereix lleis de la fluctuació en l'espai i en el temps de l'energia, en un raig de radiació de temperatura definida.

Si ara comparem la llei de fluctuació d'energia deduïda de la mesura d'entropia de la radiació amb la llei de fluctuació invocada per la teoria clàssica, trobem que en addició a les fluctuacions admeses per la llei més moderna, sembla una nova mena de fluctuació enterament diferent, l'estadística de la qual pot ésser explanada solament per la presència d'àtoms d'energia discrets de magnitud de quantum-de-llum. Les fluctuacions són massa grans a baixes temperatures per ésser considerades per la teoria clàssica.

En tot aquest estudi no hi juga cap paper la interacció entre radiació i matèria. Nosaltres no podem estar-nos d'atribuir al quantum-de-llum una existència física real en el buit absolut. Això fou assenyalat primerament per A. EINSTEIN en 1909. Per altra part, no obstant, no podem esguardar els quants-de-llum com independents un de l'altre. Així, doncs, obtindriem solament la segona mena de fluctuació d'energia, i no aquelles fluctuacions que predominen en les temperatures altes i que són determinades per la teoria clàssica. També aquestes hom les recerca per la llei de radiació basada sobre els mesuraments.

Ací hom obra aquella esquerda que, en la meua opinió, penetra al fons de l'estructura de la teoria del quantum. Cap dels més recents avenços l'ha omplenat completament. Sens dubte la interdependència estadística dels quants-de-llum està relacionada als fenòmens d'interferència de raigs lluminosos de la mateixa font. Hom pot, tal vegada, pensar en aquest cas que cada quantum-de-llum transporta al voltant d'ell l'empremta del seu origen i que dos quants-de-llum del mateix origen poden interferir entre ells quan xoquen. Però, en aquest cas, la dificultat no seria pas evitada per la meditació. En febles intensitats, les probabilitats d'una col·lisió són molt més petites per donar raó d'aquells fenòmens d'interferència que ocorren actualment. Tal vegada les equacions del camp de MAXWELL, les quals no involu-

cren de cap manera els quants-de-llum, semblen representar completament i exactament els fenòmens d'interferència, sempre sota les més febles intensitats de llum.

Per aquesta raó trobarem impossible de considerar l'energia dels quants-de-llum com a concentrada en punts separats de l'espai. Potser surt de cada un d'ells una mena d'acció a distància i per cert no solament en un pla distant, sinó també en un temps llunyà, i d'acord a la teoria de la relativitat, no podem distingir en aquesta connexió entre espai i temps. En efecte, la forma de diversos principis generals de la mecànica general i de la física atòmica exposa el concepte que el curs d'un esdeveniment és independent tant de l'estat final com de l'inicial. En aquest cas hom introdueix una certa interacció directa entre els dos estats per un temps. El principi de la casualitat seria influenciat, segons això, solament en la seva forma, no en la seva substància. No obstant, tals suggestions proposen una empresa difícil per a les nostres presents potències de concepció. Per realitzar-ho caldria canviar quasi completament totes les nostres visions del món físic.

Què guanyaríem que valgués la pena de fer tan gran sacrifici? Seria temerari d'expressar ara qualsevol judici. Voldria fer, però, almenys un intent per puntualitzar la direcció en la qual és possible recolzar la recerca del final. Probablement podríem girar el nostre esguard a la consolidació de dues grans regions de la física que encara estan separades per un abim infranquejable: la física corpuscular i la física del continuu, o física de les ondes. Si la fita és assolida algun dia, aquestes dues no apareixeran fonamentalment diferents una de l'altra, sinó que representaran solament els extrems oposats d'una regió simple que els inclou.

La teoria clàssica reconeix i tracta solament els dos casos extrems; a un costat els moviments corpusculars, en la llinde més exterior del qual radica el moviment uniforme d'una partícula en una línia dreta; a l'altre costat, moviments ondulatoris, en l'altre límit del qual radica el camp estàtic homogeni. Considerat des del novíssim punt de vista establert, no hi ha cap moviment corpuscular pur, ni cap moviment ondulatori pur. Possiblement, tot moviment corpuscular inclou quelcom de moviment ondulatori, i tot moviment ondulatori quelcom de moviment corpuscular. La diferència és solament gradual i quantitativa. En el moviment d'una partícula, tan bon punt la relació de l'impuls a la corbatura del camí—que en el moviment rectilini té una valor infinita—cau a l'ordre de magnitud de la constant universal d'acció, les lleis del moviment ondulatori comencen a jugar una part apreciable. I *vice-versa*, en la llum monocromàtica, tan bon punt la relació de la seva energia a la seva freqüència—la qual és infinita en un camp estàtic—cau en l'ordre de la magnitud de poc mencionada, les lleis corpusculars comencen a ésser apreciables.

Roman, però, el gran problema de determinar en quina relació estan en el cas general les lleis corpusculars envers les lleis del moviment ondulatori, i a això, actualment, dediquen devotament llurs millors esforços tota una generació d'investigadors. No podem tenir cap dubte que finalment hom trobarà una solució satisfactòria, i que aleshores la física teòrica haurà fet un altre avenç important vers l'assoliment de la seva última fita: la construcció d'un sistema unificat que embraci tots els fenòmens físics.

T. F. T., Trad.