

Einstein (1905): una commemoració imprescindible

Luis Navarro* i Emma Sallent†

Un home casat i una vida molt agradable

El febrer de 1902 Albert Einstein (1879–1955) va establir-se a Berna. A l'Oficina Suïssa de Patents d'aquesta ciutat va obtenir el juny del mateix any una còmoda i desitjada feina com a perit tècnic de tercera classe. Poc després, a primers de gener de 1903, es va casar amb Mileva Marič (1875–1948), que havia estat companya seva d'estudis universitaris a la prestigiosa Eidgenössische Polytechnische Schule (Escola Politècnica Federal) de Zuric, més coneguda amb les sigles ETH.¹ Tot eren bones perspectives. En una carta a Michele Besso (1873–1955), datada pocs dies després del casament, Einstein va escriure: «Ara sóc un home casat i porto una vida molt agradable amb la meva esposa. Ella s'ocupa perfectament de tot, cuina bé i sempre està alegre.»

Va ser el primer dels dos fills de Hermann Einstein (1847–1902) i Pauline Koch (1858–1920). La seva germana Maria Einstein (1881–1951) —a la qual afectuosament anomenava Maja— sempre va estar molt lligada a ell, i el 1924 va escriure'n una petita biografia amb una gran quantitat de dades familiars de la qual sovint s'extreuen bona part de les notes biogràfiques sobre la joventut d'Einstein. Albert va néixer a Ulm, al sud d'Alemanya, en el si d'una família que el va instruir de manera força liberal en els principis del judaisme. Va cursar els primers estudis a Munic, on va rebre una educació religiosa —primer catòlica i més tard judaica— en una escola pública, com prescrivia la llei bàvara. A la tardor de 1894 —quan encara li quedaven tres cursos per acabar l'escola secundària— va abandonar Munic i va marxar a Milà per reunir-se amb els seus pares, que s'hi havien traslladat per motius de feina. Havia decidit preparar pel seu compte els exàmens d'admissió a l'ETH.

Un any després —l'octubre de 1895— Einstein va viatjar a Zuric per fer-hi les proves d'ingrés, ja que no podia ser admès directament perquè no havia obtingut el

diploma d'estudis secundaris ni havia complert 18 anys. Tot i la seva actuació notable en matemàtiques i en física, els resultats en la resta de matèries no van ser prou bons per aconseguir l'accés directe. Va haver de matricular-se, doncs, a l'escola cantonal d'Aargau —a Aarau, Suïssa— i cursar els ensenyaments que li faltaven per obtenir el diploma de Matura, que s'atorgava en finalitzar els estudis secundaris. En qualsevol cas la llegenda que Einstein va ser inicialment un alumne amb un rendiment acadèmic escàs manca de qualsevol fonament.

L'octubre de 1896 va ser admès a l'ETH per cursar el cicle de quatre anys que facultava essencialment per a la docència de matemàtiques i física a l'ensenyament secundari, raó per la qual Einstein va fixar la residència a Zuric. Començava una etapa important de la seva vida. No només en relació amb la seva eterna adhesió als costums i a la manera de ser del poble suís, sinó perquè es trobaria amb tres personatges que exercirien en ell —en un moment o altre— una influència decisiva: els seus companys d'estudis Marcel Grossman (1878–1936) i Mileva Marič, i Michele A. Besso, un enginyer suís que va esdevenir el seu amic i confident més fidel.

Poc se'n sap encara avui de Mileva Marič. Era quatre anys més gran que Einstein. Filla d'un alt funcionari hongarès, nascuda a Titel —llavors al sud d'Hongria, avui Sèrbia—, en l'adolescència havia adquirit una formació prou alta per poder cursar estudis al prestigiós ETH, on era l'única dona del seu curs. Allà, aviat va néixer una intensa relació sentimental entre Einstein i Marič. Albert va obtenir el títol de l'ETH el 1900, amb qualificacions ajustades: les més baixes dels quatre aprovats. Dels onze estudiants que havien començat només cinc van arribar a presentar-se a les proves finals, i d'ells només va suspendre Mileva. Tot i així les seves qualificacions van ser molt similars. Només en Teoria de Funcions van ser completament diferents: 11 sobre 12 per ell i 5 sobre 12 per ella, cosa que va causar el suspens de la jove. Marič ho va intentar de nou —un any després— i va tornar a suspendre, tot i l'ajuda d'Einstein.

Els altres tres companys que van obtenir el diploma amb Einstein es van quedar a l'ETH com a ajudants. Ell no va poder, tot i que ho desitjava i ho va intentar amb totes les seves forces. Va culpar del seu fracàs directament el seu professor Heinrich Friedrich Weber (1843–1912), director del seu treball final de diplomatura i del seu primer projecte de tesi doctoral; a més

***Luis Navarro** (Madrid, 1939) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1965). Actualment és professor titular d'Història de la Ciència del Departament de Física Fonamental, de la Universitat de Barcelona.

†**Emma Sallent** (Barcelona, 1970) és llicenciada en Física per la Universitat de Barcelona (1996). Actualment és doctoranda en Història de la Física al Departament de Física Fonamental, de la Universitat de Barcelona.

¹Corresponen al nom adoptat pel centre el 1911: Eidgenössische Technische Hochschule.



Figura 1: Albert Einstein al costat de Mileva Marić, la seva primera esposa, i Hans Albert, el fill d'ambdós, el 1905

d'acusar-lo en privat de certa animadversió personal, el considerava un científic incompetent, pel fet de no estar al dia dels últims desenvolupaments de la física. Contràriament, en altres ocasions es va referir en to altament elogiós a altres professors de l'ETH com, per exemple, a Hermann Minkowski (1864–1909).

Einstein va intentar obtenir un lloc de treball en centres universitaris. Entre d'altres, ho va intentar amb Friedrich Wilhelm Ostwald (1853–1932), de Leipzig, fisicoquímic, famós per les seves aportacions a la catàlisi. I també amb Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926), de Leiden, reconegut especialista en baixes temperatures. En cap cas Einstein va ser el candidat escollit. Per poder subsistir —la petita ajuda econòmica que rebia encara dels seus pares resultava insuficient— va recórrer a les substitucions i a altres treballs temporals a l'ensenyament secundari, fins que els bons oficis del pare del seu company Grossman li van obrir les portes de l'Oficina Suïssa de Patents. Hi va ingressar el juny de 1902 i es va quedar a Berna durant set anys, fins que es va traslladar com a professor extraordinari de física teòrica a la Universität Zürich el 1909.

Els mesos que van transcórrer entre la finalització dels seus estudis a l'ETH de Zuric i el trasllat a Berna no van ser temps perdut per a Einstein pel que fa la seva activitat científica. Al final de 1900 —cinc mesos després de graduar-se— va enviar a la prestigiosa revista *Annalen der Physik* el seu primer treball científic, que va aparèixer publicat el març de 1901 amb el títol «Conclusions a partir dels fenòmens de capillaritat» (Einstein, 1901). Einstein en va presentar una versió ampliada com a tesi doctoral a la fi d'aquell mateix any a la Universität Zürich; el professor Alfred Kleiner (1849–1916), especialista en electricitat d'aquesta universitat, n'era

el supervisor. Consta que la tesi va ser retirada setmanes després; previsiblement per Einstein mateix, davant l'opinió negativa dels encarregats de fer-ne l'informe preceptiu.

Poc abans de viatjar a Berna, Einstein va rebre una carta de Marić des de casa dels seus pares a la Sèrbia actual, en què l'informava del naixement de Lieserl, una filla de tots dos de la qual fins fa poc no es coneixia l'existència i que, a la vista de la manca total d'informació posterior al seu naixement, devia morir molt aviat o, el que sembla més probable, devia ser donada en adopció davant les previsibles dificultats d'una mare soltera de l'època.

El seu segon treball, en la mateixa línia de l'anterior, no es va fer esperar. Va ser rebut, també als *Annalen*, la primavera de 1902, quan Einstein ja estava instal·lat a Berna, i va aparèixer publicat al mes de juliol amb el títol «Sobre la termodinàmica de la diferència de potencial entre metalls i solucions completament dissociades de les seves sals i sobre un mètode elèctric per a la investigació de les forces moleculars» (Einstein, 1902a). Tots dos treballs perseguïen bàsicament el mateix objectiu: el descobriment de les característiques de les forces intermoleculars mitjançant l'anàlisi dels seus efectes en certs comportaments dels líquids.

Feia temps que en els plans d'Einstein figurava el matrimoni amb Marić tan aviat com obtingués la mínima independència econòmica, malgrat la forta oposició familiar. La seva feina recent a l'Oficina de Patents, i potser la mort del seu pare en aquells dies a Milà, li van facilitar l'acompliment del seu propòsit. El casament es va celebrar a principi de 1903. Quedaven lluny en la seva memòria, però no en el temps, els monòtons anys escolars, els freqüents canvis de domicili, la recerca d'una feina digna i les discussions altisonants amb els pares, especialment amb la seva mare, davant l'opressiu interès que mostraven per evitar a qualsevol preu el casament amb Mileva.

Poc després de casar-se, va trobar-se a Berna Maurice Solovine (1875–1958), un jove filòsof romanès àvid d'idees sobre la física del moment —al qual després es va referir de vegades com al «bo d'en Solo»—, i Conrad Habicht (1876–1958), un amic de Zuric que venia a ampliar els estudis de matemàtiques. Einstein es va erigir en líder de la terna, que, amb gran pompa, van batejar com a Acadèmia Olímpia. Es reunien regularment, encara que d'una manera informal, per discutir de filosofia, física i literatura. Tot i que l'Acadèmia es va dissoldre tres anys després, per la separació física dels seus membres, no es va esvaïr mai del record d'Einstein. Mig segle després, en una carta dirigida a Solovine, Einstein rememorava les discussions i les lectures que hi havien tingut lloc —Sòcrates, Plató, Spinoza, Hume, Mach, Poincaré, Racine i Cervantes, entre d'altres— i es referia a «la nostra felicitat «Acadèmia», que malgrat tot era menys infantil



Figura 2: Albert Einstein a l'Oficina Suïssa de Patents, a Berna

que les respectables que després vaig arribar a conèixer més de prop».²

Els seus dos treballs sobre la natura de les forces moleculars no van tenir gaire impacte, tot i que el mateix Einstein es va encarregar d'enviar separates a alguns dels líders del moment; en particular a aquells a qui s'havia adreçat per sol·licitar una plaça acadèmica. Però Einstein tampoc degué valorar-los gaire positivament. En alguna ocasió posterior s'hi va referir en un to gairebé despectiu, considerant-los senzillament com els dos primers treballs d'un debutant sense experiència en un camp realment complicat. Tampoc en fa cap menció en les referències autobiogràfiques que Einstein dedica als seus primers passos en el camp de la investigació.

No passa el mateix amb els treballs immediatament posteriors. Entre setembre de 1902 i juny de 1904, amb Einstein ja establert a Berna, veuen la llum a través dels *Annalen* tres articles seus dedicats a presentar una formulació pròpia de la mecànica estadística clàssica de l'equilibri (Einstein, 1902b, 1903, 1904). Encara que amb clara originalitat, segueix la línia tradicional de la teoria cinètica de Ludwig Boltzmann (1844–1906), completament diferent de la que el físic nord-americà Josiah Willard Gibbs (1839–1903) acabava de presentar en el seu llibre *Elementary principles in statistical mechanics*, de 1902; llibre que, segurament, Einstein no va arribar a conèixer fins el 1905, any de l'aparició de la traducció alemanya.

L'objectiu bàsic dels treballs que componen l'anterior trilogia es pot resumir d'aquesta manera: obtenir les lleis de la termodinàmica, en especial el segon principi, partint de la hipotètica constitució molecular de la ma-

²Carta d'A. Einstein a M. Solovine, 25 de novembre de 1948; citada a Pais, pàg. 61 (1984).

tèria, suposant que les molècules es comporten d'acord amb la mecànica newtoniana i utilitzant la descripció probabilística dels estats termodinàmics introduïda per Boltzmann. Tot i que la repercussió d'aquests treballs en aquell moment va ser mínima, hi haurem de tornar més endavant.

L'últim article d'aquesta trilogia, aparegut el juny de 1904 amb el títol «Sobre la teoria molecular general de la calor», mostra un estil molt més depurat que els anteriors i una gran profunditat en el tractament, compatible amb la senzillesa de l'exposició. Difícilment es podia endevinar que l'autor és un jove de 25 anys, distanciat en aquell moment del món acadèmic. És un treball d'anàlisi imprescindible si es té interès en l'evolució del pensament científic del nostre personatge.

En aquest article apareixen les motivacions que van portar Einstein a un camp fora dels seus interessos científics: la radiació del cos negre. És el primer cop que s'entreu una relació entre el món de la física estadística —fins llavors el preferit d'Einstein— i el de la física quàntica —a punt de començar a absorbir una bona part de les seves energies. Aquesta relació resultarà essencial per comprendre el desenvolupament de les idees d'Einstein en aquests camps durant, almenys, els vint anys següents.

Mitjançant la seva autobiografia, les cartes escrites a la seva promesa Mileva durant l'etapa de prometatge en què van viure en ciutats diferents, i la documentació inclosa en els *Collected Papers* és possible fer-se una idea ajustada dels interessos científics d'Einstein i de la seva formació acadèmica en aquell moment, adquirida essencialment mitjançant lectures directes. Per exemple, consta que posseïa un alt grau d'assimilació de la teoria del camp electromagnètic de James Clerk Maxwell (1833–1879). Coneixia les principals aportacions de Hermann von Helmholtz (1821–1894), Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) i Heinrich Rudolph Hertz (1857–1894) a la física del moment en general i a l'electromagnetisme en particular. I estava profundament impressionat per les idees contingudes en el llibre que Ernst Mach (1838–1916) havia dedicat al desenvolupament historicocrític de la mecànica.

També havia seguit els primers intents de Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) per formular una teoria sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment. I era un bon coneixedor, i admirador, de Boltzmann; especialment de les seves idees sobre la concepció estadística de la segona llei de la termodinàmica, així com de la seva teoria cinètica dels gasos. En certs moments es va interessar pels treballs experimentals de Philipp E. A. von Lenard (1862–1947) sobre la producció de raigs catòdics per llum ultraviolada, cosa que després es va anomenar *efecte fotoelèctric*. Coneixia els estudis de Wilhelm Wien (1864–1928) sobre la termodinàmica de la radiació, i òbviament estava assabentat de les últimes idees de Max

ANNALEN DER PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH
F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

DER GANZEN REIHE 322. BAND.

KURATORIUM:

F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE,
W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG

DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

UND INSBESONDERE VON

M. PLANCK

HERAUSGEGEBEN VON

PAUL DRUDE.

MIT FÜNF FIGURENTAFELN.



LEIPZIG, 1905.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIIUS BARTH.

Figura 3: Portada del volum 17 d'Annalen der Physik, en el qual Einstein va publicar tres dels seus famosos articles de 1905

Planck (1858–1947) sobre les propietats de la radiació del cos negre.

A pesar d'una formació tan exquisida i completa en física teòrica, Einstein semblava partir d'una posició en principi desfavorable. La seva escassa relació amb el món acadèmic després d'haver acabat els estudis a l'ETH podia representar un factor negatiu a l'hora d'afrontar problemes de més envergadura. Però també podia ser just el contrari: la gosadia de la seva joventut i la manca de lligams amb les autoritats que havien de donar alguna mena de beneplàcit al seu treball, potser van fer més fàcil que la seva intel·ligència i la seva imaginació es desenvolupessin amb plenitud. Tampoc hem de deixar de banda els beneficis —reconeguts més tard pel mateix Einstein— que la seva feina com a analista consciencios i rigorós de les sol·licituds de patents, cosa que l'obligava a una relació permanent amb el món de les invencions i l'experimentació, reportava a la seva formació.

En qualsevol cas havia aconseguit una estabilitat la-

boral i afectiva que perseguia des del final dels seus estudis a l'ETH. Els cinc treballs anteriors als *Annalen* l'havien familiaritzat amb la forma de redactar els resultats de les seves investigacions. Era el moment adequat. A més d'examinar patents, ara podria abordar l'anàlisi profunda de certes qüestions importants de física que el preocupaven des de feia temps i sobre les quals tenia algunes idees. Per exemple, des de molt petit l'havia seduït el misteri que amaga el comportament d'una brúixola, sempre obligada a mirar cap al nord guiada per una força misteriosa. I més endavant, quan estava a punt de començar els estudis universitaris, es plantejava amb freqüència situacions una mica enigmàtiques que la majoria de vegades acabaven conduint-lo a la necessitat de descobrir l'autèntica natura de la llum. Per exemple, un d'aquests pensaments recorrents consistia a imaginar-se què passaria si es pogués cavalcar sobre un raig de llum: què es veuria, si és que es veia alguna cosa? O potser aquesta qüestió no estava ben plantejada del tot?

Quanta d'energia: aplicacions i primer impacte³

A partir de la documentació existent, en particular de les cartes escrites a Mileva Marič, es pot afirmar que Einstein coneixia les idees de Kirchhoff sobre la radiació tèrmica; com a mínim a través dels dos capítols que hi dedicava el llavors conegut llibre de Mach *Die Prinzipien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt*, de 1896. En particular sabia que l'energia emesa pel cos negre en equilibri a una certa temperatura és una funció universal de la temperatura absoluta i de la longitud d'ona considerada. També coneixia els principals intents per trobar aquesta funció universal, en particular sabia que la funció proposada per Wien el 1896 era la que millor s'ajustava a les dades experimentals existents al final del segle XIX.

Einstein estava al corrent de les aportacions de Planck, que havia ideat un model en què la radiació interaccionava amb un conjunt de ressonadors —oscil·ladors harmònics carregats elèctricament— i el sistema es trobava en equilibri tèrmic a una certa temperatura T . Amb l'ajuda de l'electromagnetisme maxwellià, Planck va obtenir una fórmula, que va resistir admirablement el pas del temps, per relacionar la distribució espectral de la densitat d'energia de la radiació $\rho(\nu, T)$ (energia per unitat de volum i per unitat d'interval de freqüència) amb l'energia mitjana per oscil·lador $\bar{E}(\nu, T)$ d'un

³Entre les fonts més àmpliament consultades per a la redacció d'aquest apartat hem de destacar Stachel, «Editorial note: Einstein's early work on the quantum hypothesis», pàg. 134–148 (1989). No poques vegades hem recorregut al capítol 19 de Pais (1984), i també a investigacions pròpies, com ara el capítol II de Navarro (1990). En el text se citen altres fonts més específiques, si escau.

conjunt de ressonadors monocromàtics de freqüència ν :

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \bar{E}(\nu, T), \quad (1)$$

on c representa la velocitat de la llum en el buit. Aquesta expressió, juntament amb els mètodes estadístics de Boltzmann, i alguna hipòtesi addicional sobre el comportament dels ressonadors, permetia deduir la fórmula de Wien.

D'altra banda, Planck, amic personal de Heinrich Rubens (1865–1922) que treballava amb Ferdinand Kurlbaum (1857–1927) al laboratori d'òptica del Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Institut Imperial Fisicotècnic) de Berlín —un dels més ben equipats del moment—, estava al corrent dels desajustos que els experiments posaven de manifest per la fórmula de Wien en la zona de l'infraroig; en particular per a longituds d'ona entre 30 i 60 micres i temperatures entre 200 i 1.500 °C. Planck, informat d'aquests resultats per Rubens, va trobar una modificació aparentment simple de la fórmula de Wien que semblava ajustar-se perfectament a les noves dades, cosa que li va confirmar immediatament Rubens mateix després de les comprovacions oportunes. Tot va succeir en pocs dies del mes d'octubre de 1900. Així va ser com el 19 del mateix mes —una setmana abans que Rubens i Kurlbaum fessin públics els seus resultats!— Planck va presentar davant la Societat Alemanya de Física la seva nova fórmula per a la distribució espectral del cos negre:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1}, \quad (2)$$

on k representa la constant de Boltzmann i h , una nova constant universal, després coneguda com a *constant de Planck*.

Tots els esforços de Planck es van dirigir llavors a trobar una justificació teòrica de l'expressió anterior «a qualsevol preu». El procediment escollit passava per determinar l'entropia mitjana per ressonador $\bar{S}(\nu, E)$ per a un conjunt de ressonadors monocromàtics de freqüència ν i energia total E i introduir la temperatura absoluta mitjançant la relació termodinàmica:⁴

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial \bar{S}(\nu, E)}{\partial \bar{E}(\nu, T)}. \quad (3)$$

És obligat fer referència a l'«acte de desesperació» que va suposar per a Planck adoptar el mètode estadístic de Boltzmann per calcular l'entropia mitjana per ressonador \bar{S} , que, substituïda a (3), permetia trobar l'energia mitjana per ressonador \bar{E} , que, a la vegada i

⁴És la forma usual d'introduir la temperatura absoluta quan es planteja el problema inicialment en la col·lectivitat microcanònica, que és l'adequada per descriure un sistema amb energia total donada.

mitjançant (1), donava la fórmula de Planck (2). Planck es va trobar, però, amb una gran sorpresa: per obtenir realment la seva fórmula per a la radiació, l'energia de cada ressonador de freqüència ν només podia valer un múltiple sencer de la quantitat $\varepsilon = h\nu$. Havia nascut el quàntum d'energia per a la radiació com una estranya propietat dels ressonadors de Planck, condició suficient per obtenir la seva llei de radiació.

Tot i que Einstein estava al corrent d'aquestes investigacions, els seus primers interessos científics no seguien aquesta direcció. La motivació per reorientar les seves investigacions la podem trobar en el darrer treball de la trilogia —apareguda entre 1902 i 1904— en la qual presentava una formulació original de la mecànica estadística de l'equilibri i va arribar a la conclusió que la radiació del cos negre podia ser un sistema adequat per contrastar experimentalment alguns aspectes problemàtics de la seva nova teoria estadística.

132

**6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.**

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung

Figura 4: Primeres línies de l'article de 1905 sobre els quàntums d'energia

Amb aquests antecedents és el moment de fer algunes consideracions sobre el treball titulat «Sobre un punt de vista heurístic en relació amb la producció i transformació de llum» (Einstein, 1905a). És en aquest famós article de 1905 on Einstein bateja amb el nom de *principi de Boltzmann* —així es coneix des d'aquest moment— l'expressió que relaciona la probabilitat d'un estat macroscòpic i la seva entropia termodinàmica:

$$S - S_0 = k \ln W, \quad (4)$$

on S_0 representa l'entropia d'un cert estat, S l'entropia en un altre estat arbitrari i W la probabilitat relativa entre aquest i el primer. El principi de Boltzmann tenia en aquest treball un paper essencial i molt diferent del que li havia adjudicat Planck en les seves investigacions sobre la radiació.

L'article comença criticant el tractament anterior de Planck, que no semblava haver-se apartat el més mínim de la física clàssica, incloent-hi la teoria cinètica, de la qual són pilars bàsics l'expressió (4) i el principi d'equipartició de l'energia. Segons aquest principi —afirmava Einstein—, l'equilibri tèrmic dels ressonadors planckians implicava que

$$\bar{E}(\nu, T) = kT. \quad (5)$$

Aquesta expressió, substituïda a (1), no només no conduïa a la fórmula de Planck (2), sinó que portava a:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2. \quad (6)$$

Aquesta expressió, coneguda com a *lleï de Rayleigh-Jeans*, era una bona aproximació per a «grans» longituds d'ona, però conduïa inexorablement al que uns anys després Paul Ehrenfest (1880–1933) va batejar amb el nom de *catàstrofe ultraviolada*: en integrar (6) per a totes les freqüències s'obté una energia total infinita, que resultava totalment inadmissible.

Per Einstein, però, aquest no era l'únic problema del tractament de Planck, que, d'una banda, s'havia basat en un model sense garanties —el dels ressonadors planckians— i, de l'altra, havia utilitzat els mètodes de Boltzmann, en particular l'expressió (4), sense que la probabilitat W que hi apareix estigués clarament definida i la seva utilització s'ajustés a les lleis ordinàries del càlcul de probabilitats. D'aquí ve l'interès d'Einstein per intentar comprovar si el resultat de Planck era realment una característica de la radiació; és a dir, si el quàntum no només era condició suficient com havia demostrat Planck, sinó també una propietat necessària per entendre el comportament de la radiació.

La proposta d'Einstein passava per introduir la idea de «probabilitat estadística» com una noció que, segons el seu parer, feia innecessari qualsevol supòsit addicional sobre W . Considera un gas amb n molècules que inicialment ocupa un volum V_0 i que es troba en un estat al qual correspon l'entropia S_0 . Només s'admet que no hi regions ni direccions privilegiades en el volum ocupat pel gas i que es tracta d'un gas ideal. Si el gas pateix una transformació consistent en passar a ocupar un volum V «sense cap altre canvi en el sistema», li correspon una nova entropia S , la relació de la qual amb S_0 ve donada per (4). Einstein introdueix ara la noció de probabilitat estadística en assignar a W el valor:

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n, \quad (7)$$

expressió que —al seu entendre— resulta «evident».

És en ocupar-se de la radiació quan Einstein comença a desplegar la seva creativitat. No només perquè es tracta d'un tema vedat als mètodes estadístics, segons

les opinions de Boltzmann i Gibbs,⁵ sinó per la seva originalitat a l'hora de trobar recursos adequats per poder aplicar la mecànica estadística a la radiació sense recórrer a un model mecànic concret.

La novetat introduïda per Einstein —cultivada després en diferents formes— va consistir en la inversió de la utilització usual del principi de Boltzmann: davant la impossibilitat —no la dificultat, com en el cas de la matèria— de poder justificar una definició de probabilitat per a un estat de la radiació, opta per deduir aquesta probabilitat a partir de la validesa universal d'aquest principi. Amb aquest fi aplica la termodinàmica de la radiació per calcular, partint de la llei fenomenològica proposada per Wien, la variació de l'entropia de la radiació en un procés on només hi ha variació de volum. El resultat del càlcul anterior, conjuntament amb l'aplicació del principi de Boltzmann, li permet justificar que la probabilitat que en un instant escollit a l'atzar l'energia de la radiació estigui continguda en la porció V del volum V_0 ve donada per:

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{E}{h\nu}}. \quad (8)$$

La comparació entre les expressions (7) i (8) —vàlides per al gas i per a la radiació, respectivament— el conduïx a la conclusió fonamental del seu treball (Einstein, 1998, 19):

«La radiació monocromàtica de baixa densitat (dins de l'àmbit de validesa de la fórmula de radiació de Wien) es comporta termodinàmicament com si estigués formada per quàntums d'energia independents els uns dels altres i que valen $h\nu$.»

És conegut que Einstein no recorre en el seu treball a la llei de Planck, sinó a la proposta de Wien de 1896 com a expressió de les dades experimentals sobre la radiació del cos negre. A la vista d'això està completament justificada la doble pregunta: com és que Einstein no utilitza la llei de Planck i com és que també arriba a la quantificació de l'energia utilitzant la llei de Wien per a la radiació?

Comencem per la primera qüestió. Tot i que no deïxa constància escrita del motiu de la seva renúncia a emprar una llei que s'ajustava més als experiments, la raó ens sembla òbvia: és fàcil comprovar que, partint de la llei de Planck i mantenint el tractament emprat el 1905, no s'arriba a les expressions adequades per justificar l'analogia en què es basen les seves conclusions. Pel que fa a la segona qüestió, la solució avui és clara. Com Ehrenfest va demostrar sis anys més tard, la llei

⁵Per comprovar com són de contundents els arguments amb què Gibbs rebutja l'aplicació de la mecànica estadística a la radiació tèrmica, vegeu Gibbs, pàg. 167 de la reimpressió (1902).

proposada per Wien el 1896 fa tan necessària la quantificació de l'energia com la proposada per Planck el 1900 (Navarro i Pérez, 2004, 115–116).

El treball inclou un cert contrast experimental del resultat bàsic obtingut —la quantificació de l'energia de la radiació— mitjançant la seva aplicació a l'anàlisi d'alguns fenòmens relacionats amb l'emissió i la transformació de la llum: la dita regla de Stokes, l'emissió de raigs catòdics per il·luminació de cossos sòlids (efecte fotoelèctric) i la ionització de gasos per llum ultraviolada. Per aquesta raó s'ha d'assenyalar l'equívoc que suposa referir-se a l'efecte fotoelèctric com a la motivació d'aquest article d'Einstein el 1905. A part que l'esmentat efecte era només una de les tres aplicacions analitzades, la seva explicació teòrica no era l'objectiu del treball; entre altres raons perquè les mesures existents en aquella època eren tan escasses que difícilment es podia detectar a través d'aquestes mesures una violació del comportament clàssicament previst per a la radiació.

Amb una estricta mentalitat actual, potser resulti sorprenent descobrir que l'acollida del treball d'Einstein no va ser gens positiva. La tònica de l'impacte que va causar l'article en general, i la hipòtesi dels quàntums en concret, es reflecteix clarament en la presentació —altament elogiosa en conjunt— d'Einstein com a membre de l'Acadèmia Prussiana de Ciències, llegida per Planck el juny de 1913! (Beck, 1995, 336–338):

«En suma, pot afirmar-se que entre els importants problemes que tant abunden en la física moderna, és difícil trobar-ne un davant el qual Einstein no adoptés una posició de forma notòria. El fet que alguna de les seves especulacions no donés en el blanc, com per exemple la hipòtesi sobre els quàntums de llum, no ha de ser gaire esgrimit en contra seva, atès que, sense assumir un risc de tant en tant, resulta impossible, fins i tot en la ciència natural més exacta, introduir veritables innovacions.»

En principi es podia comprendre que la prevenció davant els quàntums estava justificada amb escriure en tant que no es mesuressin amb fiabilitat les principals característiques experimentals de l'efecte fotoelèctric i es posés clarament de manifest el seu acord amb les previsions de la teoria quàntica esbossada per Einstein. Res més allunyat de la realitat; tot i que aquesta tasca experimental va ser admirablement portada a terme el 1916 pel nord-americà Robert A. Millikan (1868–1953), ni tan sols aquest físic —com la majoria de físics del moment— va creure que els resultats de les seves mesures representaven la confirmació de la hipòtesi quàntica.

Einstein mateix tampoc no mostrava una actitud decidida respecte a això. Per exemple, al Primer Congrés Solvay (1911) va insistir en el caràcter provisional dels quàntums sobre la base de la seva aparent incompatibi-

litat amb l'electromagnetisme de Maxwell. La seva correspondència amb Besso també reflectia contínuament dubtes del mateix tipus. Només després d'un llarg i sinuós camí de més de deu anys, els inicials quàntums d'energia d'Einstein —insistim: obscures unitats elementals d'intercanvi d'energia entre radiació i matèria— es van convertir en *fotoons*, autèntiques partícules elementals constituents de la radiació electromagnètica.⁶ El nom de *fotoó* és posterior: el va proposar Gilbert N. Lewis (1875–1946) a l'editor de la revista *Nature* i es va difondre ràpidament, especialment després que tingués lloc el Cinquè Congrés Solvay (1927), a Brussel·les, sota el lema «Electrons i fotoons».

Tot i que ens allunyem una mica de 1905, creiem que val la pena assenyalar que la introducció del concepte de *fotoó* no va estar exempta de problemes. Després del rebuig generalitzat inicial de la nova partícula elemental, per la seva presumpta incompatibilitat amb l'electromagnetisme maxwellià, la situació va canviar substancialment el 1923, quan Arthur H. Compton (1892–1962) i també Peter J. W. Debye (1884–1966), de manera independent, van aconseguir una explicació teòrica ajustada als resultats experimentals obtinguts en analitzar la dispersió de raigs X per electrons atòmics dèbilment lligats (efecte Compton). I ho van fer unint en la seva explicació dues teories independents i controvertides d'Einstein: la teoria quàntica i la relativitat especial.

Però tampoc això va ser suficient perquè el *fotoó*, amb les seves implicacions, fos definitivament admès en l'escenari de la física. Per exemple, el 1924 Niels Bohr (1885–1962), Hendrik A. Kramers (1894–1952) i J. Clarke Slater (1900–1976) van publicar un treball titulat «La teoria quàntica de la radiació» (Bohr et al., 1924) —després conegut com a BKS, per les inicials dels autors— en què s'intentava justificar el rebuig obert del *fotoó*, admetent la violació de la conservació de l'energia i del moment lineal en els processos elementals, i recorrent a uns misteriosos camps virtuals incompatibles amb la causalitat ordinària. Cap d'aquestes idees resulta estranya a la física actual, però el 1924 es van utilitzar en una sola direcció: la de desterrar definitivament el *fotoó*.

Les idees desenvolupades en BKS mai van aconseguir imposar-se, perquè uns mesos després —el 1924 i el 1925— Walther Bothe (1891–1957) i Hans Geiger (1882–1945) van publicar diversos treballs de caràcter experimental en els quals, a través d'una anàlisi enginyosa i original de certes característiques de l'efecte Compton, posaven de manifest el que era insostenible de les principals hipòtesis de BKS i alhora confirmaven les previsions basades en les idees einsteinianes. Bé es pot afirmar que, només des de llavors, el *fotoó* ocupa un lloc destacat en l'escenari de la física.

⁶Per a una exposició més detallada de la trajectòria que porta dels quàntums als fotoons, i on algun dels famosos *Gedanken-Experimente* —experiments mentals— d'Einstein va tenir un paper destacat, podeu veure Navarro, pàg. 111–145 (1990).

Finalment, un comentari sobre la concessió del Premi Nobel de Física de 1921 a Einstein. Sense entrar en els detalls de les nombroses i variades propostes que donaven suport a la seva candidatura des de 1910, potser resulta sorprenent per a alguns constatar que la recompensa no li arribés per la teoria de la relativitat. Però l'escassa evidència experimental d'aquesta teoria, que, en opinió dels membres influents del Comitè existia en aquell moment, impedia considerar-la una teoria confirmada. Una cosa semblant es podria dir de la seva discutida teoria quàntica. Però no de la llei que regeix l'efecte fotoelèctric, tenint en compte que l'equació proposada el 1905 ja s'havia contrastat experimentalment fins a la sacietat.

Davant les pressions de diferent tipus perquè la ja mítica figura rebés el famós premi, el Comitè —tradicionalment conservador— va optar per la solució de mínim risc: a Einstein se li va concedir el premi «pels seus serveis a la física teòrica, i especialment pel descobriment de la llei de l'efecte fotoelèctric». La solució no va satisfer a tothom. Probablement ni el mateix Einstein, si ens atenim al discurs del Nobel —pronunciat el 13 de juliol de 1923, més de sis mesos després que se li comunicés la concessió— que portava el títol explícit d'*Idees i problemes fonamentals de la teoria de la relativitat*.

Molècules: les enigmàtiques danses brownianes⁷

Com hem comentat anteriorment, Einstein va publicar el 1902 i el 1904 tres articles que constitueixen una formulació pròpia —en la línia de Boltzmann i diferent de la de Gibbs— de la mecànica estadística de l'equilibri.⁸ En la seva autobiografia científica descriu amb nitidesa els seus objectius en aquesta direcció (Schilpp, 1970, 46–47).

«Com que no estava familiaritzat amb les investigacions de Boltzmann i Gibbs, que havien aparegut abans i que en realitat esgotaven el tema, vaig desenvolupar la mecànica estadística i la teoria cineticomolecular de la termodinàmica que es basava en aquella. El meu objectiu principal consistia a trobar fets que poguessin garantir tant com fos possible l'existència d'àtoms de dimensions finites determinades. Vaig descobrir llavors que, d'acord amb

⁷Entre les fonts més consultades per a la redacció d'aquest apartat destaquem Stachel (1989): «Editorial note: Einstein's dissertation on the determination of molecular dimensions», pàg. 170–182 i «Editorial note: Einstein on Brownian motion», pàg. 206–222. També, en alguns casos, el capítol 5 de Pais (1984). Per als aspectes més concrets relatius al moviment brownià s'ha tingut molt en compte el capítol 15 del volum 2 de Brush (1976). En el text se citen altres fonts més específiques, si escau.

⁸Per a una anàlisi del contingut d'aquesta trilogia podeu veure Navarro, pàg. 21–50 (1990). I per a la comparació entre les respectives formulacions de Gibbs i d'Einstein, Navarro (1998).

la teoria atomística, havia de ser possible observar un moviment de partícules microscòpiques en suspensió, sense saber que observacions concernents al moviment brownià eren conegudes des de feia temps.»

És en aquesta línia on s'han d'emmarcar les investigacions d'Einstein sobre mecànica estadística de 1905. En particular la seva tesi doctoral,⁹ en què presenta un mètode original en el qual conjuga amb habilitat els mètodes hidrodinàmics de Stokes (física del continu) amb una formulació personal, basada en la teoria molecular, de la teoria de Van't Hoff sobre dissolucions (física del discret). El mètode emprat per Einstein permetia l'obtenció de valors numèrics tant per a les dimensions de les molècules com per al *nombre d'Avogadro*.

De fet Einstein va abordar el tema des de diferents perspectives al llarg del primer quart del segle XX. En el seu famós article de 1905 sobre els quàntums d'energia, ja dedueix per al nombre d'Avogadro el valor $6,173 \cdot 10^{23}$, obtingut a partir de la llei de radiació de Wien. En la tesi doctoral, ara recorrent a suspensions en líquids, escriu el valor $2,13 \cdot 10^{23}$. I en un suplement que acompanya la publicació del seu article de 1905 als *Annalen*, Einstein proposa el valor $4,153 \cdot 10^{23}$, com el que està més d'acord amb les dades experimentals del moment. Aquest valor es va obtenir mitjançant un càlcul que contenia un error matemàtic descobert anys més tard pel seu col·laborador Ludwig Hopf (1884–1939). L'oportuna correcció va portar Einstein a proposar el 1911 el valor $6,563 \cdot 10^{23}$ (Einstein, 1911).

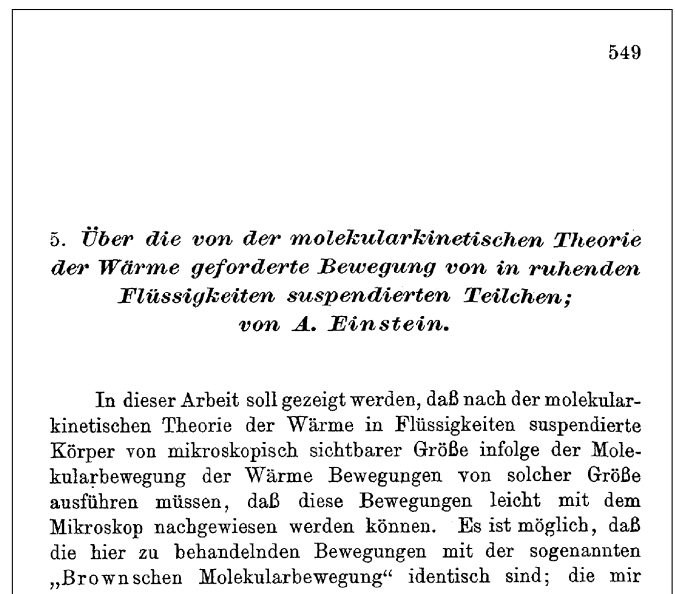


Figura 5: Primeres línies de l'article de 1905 sobre el moviment brownià

⁹Per a la versió de la tesi doctoral lleugerament revisada que es va publicar uns mesos després als *Annalen*, vegeu Einstein (1906).

En el seu article sobre el moviment brownià (Einstein, 1905b) Einstein no va arribar a obtenir un valor per al nombre d'Avogadro, sinó que va proposar una fórmula per obtenir-lo. El càlcul mitjançant l'esmentada expressió requeria la prèvia determinació experimental dels camins lliures mitjans recorreguts per les molècules.

L'altre tòpic estretament relacionat amb aquest article d'Einstein és el de l'explicació del moviment brownià. Pot resultar interessant referir-nos a l'estat del problema abans de 1905. Robert Brown (1773–1858), un destacadíssim botànic escocès, és el que per primer cop va descriure el fenomen el 1828. En dipositar el pol·len de diferents plantes en aigua, Brown va detectar una dispersió del pol·len en molècules, cadascuna de les quals apareixia sotmesa a moviments irregulars directament observables al microscopi. La novetat en l'aportació de Brown rau en el fet de comprovar que tant la matèria orgànica com la inorgànica pot ser dividida en corpuscles microscòpics que, submergits en fluids, experimenten aquest curiós moviment en ziga-zaga, cosa que condueix el problema al camp de la física.

Finalment, abans d'entrar en el contingut de l'article, un aclariment. El treball d'Einstein en què posa les bases per a l'explicació del moviment brownià va aparèixer publicat abans que la seva tesi doctoral. De vegades s'ha insinuat que les primeres idees sobre la conjunció —en una mateixa teoria sobre les dissolucions— de la difusió i de la viscositat apareixen en la seva explicació del moviment brownià i que en la tesi doctoral es limita a repetir aquests mateixos arguments. Això no és cert: convé precisar-ne la cronologia.

La tesi doctoral figura datada el 30 d'abril de 1905. Els tràmits burocràtics —i algun lleuger retoc— van fer que se'n demorés la publicació als *Annalen* fins al febrer de 1906. El famós article en què s'explica el moviment brownià, tot i que va aparèixer als *Annalen* el juliol de 1905, està datat al maig. Tot això indica clarament que les idees d'Einstein sobre la física de les molècules suspeses en líquids es van plasmar primer en la tesi doctoral i després en l'article sobre el moviment brownià; i no al revés.

En «Sobre el moviment de partícules en suspensió en líquids en repòs, requerit per la teoria cinetomolecular de la calor» Einstein aplica la seva formulació de la mecànica estadística a l'estudi de la relació entre la pressió p exercida sobre les partícules suspeses en un líquid en funció de la concentració ν , que suposa baixa. Després de justificar que en aquestes condicions les partícules en suspensió es comporten com les partícules dissoltes, i que p és la pressió osmòtica, arriba a l'expressió:

$$p = \frac{RT}{N} \nu, \quad (9)$$

on T representa la temperatura absoluta, R la constant universal dels gasos i N el nombre d'Avogadro.

Però en el moviment de les partícules suspeses, a la força osmòtica —que tendeix a portar les partícules cap a regions de menor concentració— s'oposa la força de viscositat del líquid solvent. Si anomenem K la força osmòtica exercida sobre una partícula en suspensió, i tenint en compte que aquesta força ve donada pel gradient de p , l'última expressió condueix a

$$K\nu = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{RT}{N} \frac{\partial \nu}{\partial x}, \quad (10)$$

on x indica la direcció del moviment de la partícula.

D'altra banda, la teoria de Stokes sobre el moviment d'una partícula esfèrica de radi P —continuem emprant la notació original— que es mou en el si d'un líquid amb coeficient de viscositat k , i està sotmesa a la força K , proporciona una expressió per al nombre de partícules suspeses que travessen la unitat de secció perpendicular a la direcció del moviment per unitat de temps. Igualant aquesta expressió amb el nombre de partícules difoses en aquestes mateixes condicions, s'obté

$$\frac{\nu K}{6\pi k P} = D \frac{\partial \nu}{\partial x}, \quad (11)$$

on D representa el coeficient de difusió.

Després d'eliminar entre les dues últimes igualtats el gradient de la concentració, s'obté el valor que Einstein dedueix en el seu article per al coeficient de difusió:

$$D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi k P}. \quad (12)$$

Així, el coeficient de difusió, si no es consideren els efectes de la gravetat, depèn de constants universals, de la temperatura absoluta, de la viscositat del líquid i de les dimensions de les partícules suspeses.

Arribat a aquest punt, Einstein introdueix unes consideracions originals sobre el possible tractament estadístic del fenomen anterior, que fins a aquest moment havia analitzat segons les estrictes lleis deterministes de la física clàssica. Atès que aquestes consideracions van representar el punt de partida d'anàlisis més generals del moviment brownià, i que posteriorment han tingut gran influència en el tractament modern dels processos estocàstics,¹⁰ preferim reproduir aquí les paraules del mateix Einstein (Einstein, 1998, 35):

«Naturalment hem de suposar que el moviment de cada partícula és independent de la resta; també entendrem els moviments d'una única partícula en diversos intervals de temps com a processos independents entre ells, sempre que aquests intervals de temps no es considerin massa petits. Introduïm un interval de temps τ , que és molt petit en comparació amb

¹⁰Es pot comprovar consultant, per exemple, la recopilació continguda a Wax (1954).

els intervals de temps observables, però prou per considerar els moviments que fa una partícula entre dos intervals de temps τ consecutius com a esdeveniments independents entre ells.»

En aquestes condicions d'absència de correlacions entre intervals temporals consecutius, i suposant n partícules suspeses en un líquid, el nombre dn de partícules que pateixen —en un interval de temps τ — un desplaçament de la seva coordenada x comprès entre els valors Δ i $\Delta + d\Delta$ es podrà expressar de la manera següent:

$$dn = n\varphi(\Delta)d\Delta, \quad (13)$$

on $\varphi(\Delta)d\Delta$ representa la probabilitat que la coordenada x d'una partícula qualsevol pateixi un desplaçament comprès entre els valors Δ i $\Delta + d\Delta$, en l'interval de temps τ .

És el moment en què Einstein introdueix la concentració en el seu formalisme: $\nu = f(x, t)$ representa el nombre de partícules suspeses per unitat de volum. El valor de $f(x, t + \tau)$ es podrà deduir a partir de $f(x + \Delta, t)$. Assignant a cada possible desplaçament el seu pes corresponent s'arriba a:

$$f(x, t + \tau)dx = dx \int_{-\infty}^{+\infty} f(x + \Delta, t)\varphi(\Delta)d\Delta. \quad (14)$$

A partir d'aquí, emprant les expressions anteriors, alguna altra suposició versemblant i un raonament senzill, Einstein dedueix la ja llavors ben coneguda equació diferencial de la difusió

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2}, \quad (15)$$

on ara el coeficient de difusió ve donat per l'expressió:

$$D = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta^2}{2} \varphi(\Delta) d\Delta. \quad (16)$$

La solució de l'equació diferencial (15), amb condicions inicials i de contorn apropiades, és:

$$f(x, t) = \frac{n}{\sqrt{4\pi D}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}, \quad (17)$$

cosa que permet calcular-ne els valors mitjans. En particular Einstein obté el desplaçament quadràtic mitjà d'una partícula suspesa:

$$\lambda_x = \sqrt{x^2} = \sqrt{2Dt}. \quad (18)$$

Si se substitueix el coeficient de difusió pel seu valor segons la igualtat (12), aquesta expressió condueix al resultat final del seu treball:

$$\lambda_x = \sqrt{t} \sqrt{\frac{RT}{N} \frac{1}{3\pi kP}}. \quad (19)$$

En aigua a 17 °C, que és l'exemple escollit per Einstein per il·lustrar aquest resultat, les partícules d'una micra de diàmetre experimentarien un desplaçament mitjà en un minut que seria aproximadament de sis micres.¹¹

L'expressió anterior es pot prendre com el primer cas en què apareix una relació del tipus fluctuació-dissipació en física: es relaciona la fluctuació, representada pel camí lliure mitjà, amb un efecte de dissipació, associat a la viscositat del líquid.

Einstein no va deixar de destacar que aquesta última expressió es podria emprar també per determinar el valor de N , un cop mesurats amb prou fiabilitat els desplaçaments de les partícules en suspensió en líquids. I acaba el seu article expressant el desig que això es faci aviat (Einstein, 1998, 39):

«Esperem que algun investigador aconseguirà aviat resoldre aquestes qüestions que hem presentat aquí [la determinació de N] i que són tan importants per a la teoria de la calor.»

S'ha de deixar constància, que, ja el 1906, el físic d'origen polonès Marian von Smoluchowski (1872–1917) va publicar un treball —també als *Annalen*— en què, després de citar l'article d'Einstein de 1905, presentava un mètode alternatiu per al tractament del moviment brownià. Al seu parer, el nou mètode resultava més simple i utilitzava el càlcul combinatori com a eina matemàtica bàsica. A més de reproduir els resultats d'Einstein, Smoluchowski en generalitzava alguns en el seu treball (Smoluchowski, 1906).¹²

De tota manera el resultat final de Smoluchowski per al desplaçament quadràtic mitjà (19) diferia del d'Einstein en un factor numèric: 64/27, factor que més tard es va demostrar que era erroni i que Smoluchowski va corregir en treballs posteriors. Va ser precisament el fet de voler aclarir la diferència entre els dos treballs que va conduir Paul Langevin (1872–1946) a ocupar-se del tema, i el 1908 va proposar un tractament alternatiu original del moviment brownià que també permetia deduir la validesa de l'expressió (19), però ara a partir de l'equació que després seria coneguda com a *equació de Langevin* (Langevin, 1908).

Einstein va publicar altres treballs sobre el moviment brownià; essencialment es tracta d'aclariments, refinaments i generalitzacions sobre les seves idees inicials que acabem de comentar.¹³ El tractament d'Einstein

¹¹ Einstein pren com a viscositat de l'aigua el valor $k = 1,35 \cdot 10^{-2}$ i $N = 6 \cdot 10^{23}$, «d'acord amb els resultats de la teoria cinètica dels gasos». Per a més detalls sobre l'elecció d'aquestes dades, no del tot encertada, vegeu Stachel, pàg. 234–236 (1989).

¹² Per a més informació sobre la contribució de Smoluchowski, i la seva relació amb Einstein, podeu veure Pais, pàg. 112–115 (1984) i «Editorial note: Einstein on Brownian motion», a Stachel, pàg. 210–217 (1989).

¹³ Fürth (1956) inclou una recopilació en anglès dels cinc treballs principals —apareguts entre 1905 i 1908— incloent-hi la tesi doctoral i l'article que estem comentant.

es considera un punt de partida essencial per al desenvolupament ulterior dels processos estocàstics: un tema d'actualitat no només en el camp de la física sinó també en àmbits de natura molt diferent, com ara l'anomenada *econofísica* o alguns aspectes relacionats amb les ciències socials.¹⁴

Einstein va arribar a ocupar-se, tot i que ara sense gaire èxit, del problema de la mesura experimental d'aquesta i altres fluctuacions. Per exemple, va tractar d'extrapol·lar la situació i el tractament del moviment brownià per poder aplicar-la a certs fenòmens relacionats amb les fluctuacions de tensió elèctrica en condensadors i estudiar així la possibilitat de mesurar experimentalment quantitats molt petites d'electricitat. L'assumpte el va atreure fins al punt d'arribar a pensar a patentar un artifici per dur a terme l'esmentada missió. Però la *màquina d'Einstein* —com a vegades se l'ha anomenat— no va arribar a tenir ple reconeixement, per circumstàncies variades.¹⁵

La confirmació experimental de les previsions teòriques d'Einstein sobre el moviment de partícules en suspensió en líquids va constituir una fita definitiva per a l'admissió generalitzada de la constitució molecular de la matèria. Jean Baptiste Perrin (1879–1942) va ser qui va dur a terme els experiments definitius el 1908 i el 1909, fortament atret per la possibilitat de col·laborar decisivament a demostrar la validesa de la hipòtesi molecular. Els experiments de Perrin, que van pesar decisivament en el fet que li fos concedit el Premi Nobel de Física el 1926, van subministrar a la teoria cinètica —ja batejada per Gibbs com a *mecànica estadística*— el suport experimental bàsic, com era el reconeixement de la constitució molecular que va passar a ser considerat com un fet ja demostrat experimentalment. Per aquesta raó la conversió a l'atomisme cap a 1909 va ser pràcticament general. Com a exemple, i perquè es tracta d'un dels més il·lustres activistes contra l'atomisme abans de la seva conversió, recollim dos textos eloqüents de l'energetista Friedrich Wilhelm Ostwald (1853–1932), separats només tres anys en el temps:¹⁶

«Com hem mantingut durant els darrers deu anys [...] [la teoria molecular] [...] ha de ser substituïda per una altra teoria, que s'ha anomenat *energètica* [...]. La qüestió sobre la identitat o la no identitat de diferents porcions d'aigua no té sentit, atès que no hi ha manera d'aïllar les diferents porcions d'aigua i identificar-les [...] els àtoms només són objectes hipotètics [...].»

¹⁴Vegeu per exemple Bartholomew (1982).

¹⁵Per a més detalls podeu veure: «Editorial note: Einstein's «Maschinchen» for the measurement of small quantities of electricity», a Klein et al., pàg. 51-55 (1993).

¹⁶Extractes citats a Brush, vol. 2, 698–699 (1976). La remarca en cursiva de la citació prové de l'original.

[Harvard, 1906]

«*M'he convençut que recentment hem arribat a la possessió de la prova experimental de la natura discreta o granular de la matèria, que la hipòtesi atòmica ha buscat en va durant segles, millennis fins i tot [...]* i, d'altra banda, l'acord dels moviments brownians amb les previsions de la hipòtesi cinètica, que han demostrat una sèrie d'investigadors, principalment J. Perrin, és una evidència que alhora justifica que fins i tot els científics més prudents parlin de la prova *experimental* de la natura atòmica de la matèria que omple l'espai. El que fins ara s'ha anomenat hipòtesi atòmica queda, per tant, elevada al nivell de teoria ben fonamentada [...].»

[Leipzig, 1909]

Unes dades quantitatives addicionals sobre la freqüència amb què són citades les contribucions que estem comentant, tot i que no suposin arguments definitius, ajuden a calibrar la importància que els investigadors van assignar des del principi a aquest tractament d'Einstein sobre el moviment de partícules en suspensió en líquids. Per exemple, entre la dotzena de treballs científics publicats abans de 1912 amb un nombre més gran de citacions entre els anys 1961 i 1975, quatre són d'Einstein. Entre aquests, la versió de la tesi doctoral, tal com va aparèixer als *Annalen* el 1906, figura al capdavant i l'article de 1905 sobre partícules en suspensió ocupa el tercer lloc; en la classificació citada no apareixen ni els articles sobre relativitat ni sobre teoria quàntica.¹⁷

Espai i temps: una nova concepció de les seves relacions¹⁸

En diverses ocasions Einstein va comentar que la teoria de la relativitat especial va sorgir del seu interès pels problemes que plantejava l'òptica dels cossos en moviment. Des de petit havia quedat fascinat per la natura de la llum, fascinació que el va acompanyar fins al final dels seus dies.

El seu primer assaig científic, escrit el 1895 (a l'edat de 16 anys), discutia la propagació de la llum a través de l'èter. Sabem per aquest treball que havia sentit parlar dels experiments de Hertz sobre la propagació d'ones electromagnètiques, però no coneixia les equacions de Maxwell. Com ja hem comentat, l'any següent va concebre un experiment conceptual: què passaria si un

¹⁷Aquestes dades es troben a Pais, pàg. 102 (1984).

¹⁸Entre les fonts més consultades per a la redacció d'aquest apartat hem de destacar Stachel, «Editorial note: Einstein on the theory of relativity», pàg. 253–274 (1989); Stachel, «What Song the Syrens Sang: How did Einstein Discover Special Relativity?», pàg. 157–171 (2002) i els capítols 6 i 7 de Pais (1984). En el text se citen altres fonts més específiques, si escau.

observador intentés caçar una ona de llum? I si això fos possible, hauria de poder veure la forma d'una ona de llum en repòs? Això no semblava tenir gaire sentit. Més tard es va referir a aquest experiment com el primer experiment imaginat de joventut relacionat amb la teoria de la relativitat especial.

Al segon curs a l'ETH (1897–98) Einstein va dissenyar un experiment per mesurar la velocitat de la Terra a través de l'èter; sembla, doncs, que en aquell moment no coneixia ni els treballs teòrics de Lorentz, ni l'experiment de Michelson i Morley.

L'agost de 1899 Einstein escriu a Marič:¹⁹

«Cada cop estic més convençut que l'electrodinàmica dels cossos en moviment, tal com es presenta actualment, no es correspon amb la realitat, i hauria de ser possible presentar-la d'una manera més senzilla. La introducció del terme "èter" en les teories de l'electricitat ha portat a la noció d'un mitjà del moviment del qual es pot parlar, crec jo, sense ser capaç de vincular l'expressió amb un sentit físic.»

En la mateixa carta Einstein comenta que està estudiant Hertz conduït per una incomprensió del tractat de Helmholtz sobre el principi de mínima acció en electrodinàmica. El 1890 Hertz havia proposat una electrodinàmica dels cossos en moviment basada en quatre equacions axiomàtiques. Hertz considerava que les especulacions sobre la constitució de la matèria impedièen el progrés de la ciència, i eren qüestions «il·legítimes» els plantejaments sobre la natura de l'electricitat i l'èter. En estendre, però, la seva teoria als cossos en moviment, havia hagut de decidir en quin grau l'èter contingut en un cos massiu participava del moviment del cos. Hertz havia optat per un arrossegament total, encara que havia manifestat dubtes sobre aquesta assumptió arbitrària que entrava en contradicció amb els experiments duts a terme per Fizeau o Fresnel que donaven suport a la hipòtesi d'un arrossegament parcial.

El grau d'arrossegament de l'èter i també l'oportunitat de dotar aquest mitjà de propietats mecàniques eren temes molt discutits entre els cultivadors de l'electrodinàmica de la fi de segle i era possible trobar experiments que es podien interpretar en favor de les diverses hipòtesis proposades.

Einstein comenta la seva dedicació a l'electrodinàmica en diverses cartes a Mileva Marič entre 1899 i 1901; s'hi refereix en una ocasió com «el nostre treball sobre el moviment relatiu»,²⁰ tot i que no hi ha evidència explícita del grau de participació de Marič en aquests treballs. Uns anys més tard, en una carta a Grossmann, escrita l'estiu de 1901, explica que se li ha acudit un mètode

¹⁹Carta d'A. Einstein a M. Marič, 10 d'agost de 1899. Traducció anglesa a Beck, pàg. 131 (1987).

²⁰Carta d'A. Einstein a M. Marič, 27 de març de 1901. Traducció anglesa a Beck, pàg. 161 (1987).

bastant simple per investigar el moviment de la matèria respecte de l'èter, que es basa en experiments ordinaris d'interferència. Cap al final d'aquell mateix any estava treballant en el que va definir com «un treball capital» sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment, i afirma la seva renovada convicció en les seves idees «sobre el moviment relatiu».²¹

Poc després va declarar la intenció d'estudiar en profunditat la teoria de Lorentz,²² que havia publicat el 1895 el seu *Versuch*. Més endavant Einstein va manifestar que el 1905 aquest era l'únic treball que coneixia de Lorentz, tot i que és possible que estigués assabentat dels desenvolupaments successius dels treballs d'aquest autor a través dels comentaris d'altres a l'àmpliament discutida teoria de Lorentz.

La teoria de Maxwell-Lorentz —l'anomenada *teoria de l'electró de Lorentz*— s'havia guanyat una gran acceptació. Marcava una clara distinció entre la matèria ordinària, ponderable, composta per partícules materials de dimensió finita, algunes carregades elèctricament, i l'èter. Tot l'espai, incloent-hi les regions ocupades per partícules materials, estava envaït per aquest mitjà desproveït de propietats mecàniques que sostenia les interaccions dels camps elèctrics i magnètics. Les parts de l'èter es consideraven immòbils les unes respecte de les altres, de manera que era possible definir un sistema de referència privilegiat que Lorentz associava amb el repòs absolut. En aquest sistema eren vàlides les equacions de Maxwell i es podien deduir les equacions pels altres sistemes a partir de les transformacions de coordenades de Galileu aplicades a les equacions del sistema de referència privilegiat. Però només si s'efectuaven unes determinades transformacions de coordenades d'espai i de temps, més complicades que les de Galileu, i es transformaven a més adequadament els camps elèctrics i magnètics, s'aconseguia que les equacions de Maxwell mantinguessin la seva forma fins a primer ordre en v/c .

Va proposar llavors una noció completament estranya al quadre conceptual que estava elaborant: si t mesura el temps en el sistema de referència de l'èter, en el cas en què el sistema de referència utilitzat estigués en un estat de moviment rectilini i uniforme respecte de l'èter en la direcció i sentit de l'eix x , en el sistema mòbil era necessari utilitzar una coordenada temporal, un «temps local» en la terminologia de Lorentz, $t' = t - vx/c^2$. A aquesta coordenada Lorentz no va atribuir cap significat físic particular: es tractava d'un paràmetre útil per obtenir els resultats simples desitjats.

Si existia un sistema de referència privilegiat —el de l'èter— havia de ser possible detectar el moviment de la Terra respecte d'aquest mitjà a través d'experiments òptics o electromagnètics adequats. Lorentz era conscient

²¹Carta d'A. Einstein a M. Marič, 17 de desembre de 1901. Traducció anglesa a Beck, pàg. 187 (1987).

²²Carta d'A. Einstein a M. Marič, 28 de desembre de 1901. Traducció anglesa a Beck, pàg. 189 (1987).

del fracàs d'aquests intents, en particular del resultat negatiu del de Michelson-Morley.²³

«Aquest experiment m'ha deixat molt de temps perplex i al final he trobat una única manera de reconciliar-lo amb la teoria de Fresnel. Es tracta de la hipòtesi segons la qual el segment que uneix dos punts d'un cos sòlid [...] no conserva la mateixa longitud en un moviment paral·lel i perpendicular a la direcció del moviment terrestre.»

Per explicar els resultats negatius dels experiments, Lorentz assumia que les dimensions dels cossos materials es contraïen en la direcció de la seva velocitat absoluta proporcionalment a $1 - v^2/2c^2$ (primer ordre). La «hipòtesi de la contracció», que ja apareixia en un treball de Lorentz de 1892, havia estat presa en consideració prèviament pel físic irlandès Georges F. FitzGerald (1851–1901), de manera independent. S'ha d'insistir, però, que és el moviment absolut respecte de l'èter el que produeix una contracció real i absoluta de les longituds en la direcció del moviment.

Lorentz va postular també que una càrrega e amb velocitat v , en el si d'un camp electromagnètic, està sotmesa a una força $\vec{K} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{H}/c)$, l'anomenada *força de Lorentz*, a la qual ell es refereix com a *força elèctrica*.

El 1904 i com a reacció a les crítiques de Henri Poincaré (1854–1912) a la contínua introducció de noves hipòtesis *ad hoc* per explicar cada nou experiment, va presentar una generalització de la seva teoria que preveia la introducció d'un conjunt de transformacions de les coordenades espacials i del temps —anomenades *transformacions de Lorentz* per Poincaré— i per a les components dels camps elèctrics i magnètics, de manera que sota aquestes transformacions les equacions de Maxwell en absència de càrregues tinguessin la mateixa forma en tots els sistemes de referència inercials.

Poincaré, que molt aviat va adoptar una actitud escèptica envers l'èter, i va identificar com un progrés la eliminació gradual d'aquest concepte, ja el 1888 va escriure en el pròleg de les seves conferències matemàtiques sobre la teoria de la llum:²⁴

«No té gaire importància si l'èter existeix o no realment, això és cosa dels cultivadors de la metafísica. La cosa essencial per nosaltres és que tot passa com si existís, i que aquesta hipòtesi és convenient per a l'explicació dels fenòmens. Tenim alguna altra raó per creure en l'existència dels objectes materials? Aquesta també és només una hipòtesi convenient; això no deixarà mai de ser així, mentre que no hi ha dubte que algun dia l'èter serà deixat de banda com a cosa sense utilitat.»

²³Citat a Pais, pàg. 133 (1984).

²⁴Citat a Darrigol, pàg. 19 (1995).

Tenim constància que Einstein va llegir Poincaré abans de 1905 durant les reunions regulars de lectura i discussions filosòfiques de l'Acadèmia Olímpia, ja el 1903. Maurice Solovine va deixar una llista detallada dels llibres llegits durant aquestes reunions. Referint-se a *La Science et l'hypothèse*, diu: «Ens va impressionar profundament i ens va mantenir corpresos durant setmanes!» Per tant, sembla plausible que Einstein abans de 1905 conegués les idees de Poincaré presentades al Congrés de París de 1900, que, publicades al *Physikalische Zeitschrift*, van ser en gran part incloses en *La Science et l'hypothèse*, i també les observacions de Poincaré de 1898 de «La mesure du temps», treball que apareix citat en el llibre abans esmentat. Poincaré comenta:²⁵

«No tenim cap intuïció directa sobre la igualtat de dos intervals de temps, els qui pensen que tenim tal intuïció són uns il·lusos. [...] És difícil separar els problemes de caràcter qualitatiu de la simultaneïtat dels de caràcter quantitatiu de la mesura del temps.»

Els treballs de Poincaré sobre la teoria de Lorentz van culminar en l'extensa memòria «Sur la dynamique de l'électron», que Einstein, però, no va poder llegir abans de l'elaboració del seu treball de 1905. Presentada per primer cop en versió resumida a la sessió del 5 de juny de 1905 de l'Académie des Sciences de París, i rebuda a la redacció del *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* el 23 de juliol del mateix any, va ser publicada el 1906. En aquest treball apareixen extensament tractades tant qüestions cinemàtiques com dinàmiques referents a l'electró (Poincaré, 1905 i 1906).

891

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom

Figura 6: Primeres línies de l'article de 1905 sobre la teoria de la relativitat especial

²⁵Poincaré, pàg 2 i 12 (1898). La remarca en cursiva de la citació prové de l'original.

Passem ara a comentar «Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment», treball datat a Berna el 30 de juny de 1905 i publicat als *Annalen der Physik* el 26 de setembre del mateix any (Einstein, 1905c). El treball consta d'una introducció sense títol i de dues parts, una de cinemàtica i una d'electrodinàmica. Einstein comenta en la introducció que algunes asimetries en els fenòmens electrodinàmics, com ara l'anàlisi del moviment relatiu d'un imant i un conductor —fenomen que s'interpreta de manera diferent segons que es consideri que és l'imat que està en moviment o bé el conductor— així com la impossibilitat de detectar el moviment de la Terra respecte del que anomena *medi lumínic*, l'han conduït a reformular els principis de la cinemàtica tradicional.

Per fer-ho, eleva a la categoria de postulat la conjectura que anomena *principi de relativitat*: «en tots els sistemes de coordenades en què són vàlides les equacions mecàniques, són vàlides també les mateixes equacions electrodinàmiques i òptiques». Hi afegirà un altre postulat, el de la constància de la velocitat de la llum, només aparentment incompatible amb l'anterior, segons el qual «la llum es propaga en l'espai buit a velocitat constant V , independent de l'estat de moviment del cos emissor».

La introducció d'aquests dos postulats li permetrà formular una electrodinàmica dels cossos en moviment «simple i coherent» en què la introducció d'un èter lumínic es revela supèrflua, en tant que no es requereix cap espai en repòs absolut, ni tampoc l'atribució de propietats mecàniques als punts de l'espai buit on tenen lloc els processos electromagnètics. Declara llavors que les dificultats que assetgen l'electrodinàmica provenen de la consideració insuficient de la cinemàtica del cos rígid, subjacent a tota electrodinàmica.

El primer paràgraf de l'article comença amb l'anàlisi del concepte de *simultaneïtat*. Tot judici en què intervé el temps implica la determinació d'esdeveniments simultanis. Amb un estil sospitosament planer per a un treball d'investigació, enuncia: «si dic que el tren arriba aquí a les 7 hores, el que vull dir és que l'agulla petita del rellotge que passa pel set i l'arribada del tren són esdeveniments simultanis». Tenim dificultats si volem definir *simultaneïtat* per esdeveniments que succeeixen en llocs remots, allunyats del rellotge.

Einstein proposa un mètode que ha de permetre definir els conceptes de *simultaneïtat* i de *temps* de manera pràctica: proposa un experiment físic conceptual en el qual un raig de llum surt d'un punt A en un instant t_A del temps d'un observador en A i arriba a un punt B en l'instant t_B del temps d'un observador en B i es reflecteix tornant a A en el temps t'_A . En els dos punts hi ha dos observadors dotats de rellotges en repòs d'identica construcció. Si considerem per definició que la llum triga el mateix a anar de A cap a B que de B cap a A , direm que els rellotges en repòs en A i en B marxen

sincrònicament si

$$t_B - t_A = t'_A - t_B. \quad (20)$$

D'aquesta manera es posa en relació el temps en dos llocs diferents. Suposant que aquest resultat és generalitzable a qualsevol punt i que val la propietat transitiva entre tres rellotges qualssevol, podem definir el temps d'un esdeveniment com la determinació d'un rellotge en repòs que es troba en el lloc de l'esdeveniment i que marxa sincrònicament amb un rellotge en repòs donat.

Einstein passa llavors a considerar la relativitat de longituds i temps. Considera una barra en repòs que té una longitud l . Segons el principi de relativitat, si posem aquesta barra en moviment i un observador que es mou amb la barra en mesura la longitud el resultat de la mesura serà també l . Hi ha, però, una altra manera de mesurar el que podríem anomenar *longitud de la barra en moviment*: es determinen en el sistema en repòs els punts on es troben els extrems de la barra en el mateix instant de temps del sistema en repòs i es mesura la distància entre aquests punts amb un regle en repòs en aquest sistema. Aquest cop, la mesura de la longitud de la barra en moviment des del sistema de coordenades en repòs és diferent de l . Tant la simultaneïtat com la longitud d'una barra són, per tant, conceptes relatius al sistema de coordenades respecte del qual fem les observacions.

A continuació dedueix, utilitzant la propietat d'homogeneïtat de l'espai i del temps, les transformacions de coordenades que permeten passar d'un sistema de coordenades x, y, z i temps t —el sistema en repòs— a un sistema amb eixos coincidents amb l'anterior a l'instant inicial, que es mou amb velocitat v al llarg de l'eix x en el sentit creixent, de coordenades ξ, η, ζ i temps τ . Amb una deducció una mica contorta, que de fet no reproduirà en presentacions posteriors, obté:

$$\begin{cases} \tau = \beta \left(t - \frac{v}{V^2} x \right), \\ \xi = \beta (x - vt), \\ \eta = y, \\ \zeta = z, \end{cases} \quad \text{amb } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}. \quad (21)$$

Considera llavors dues aplicacions dels conceptes deduïts: el d'una esfera que es veu com un el·lipsoide des d'un altre sistema de coordenades a causa de la contracció que experimenta la dimensió que es troba en la direcció del moviment i el retard d'un rellotge que es mou respecte del sistema de referència en repòs.

Per concloure la part cinemàtica dedueix la llei de composició de velocitats amb la qual cosa comprova com el principi de constància de la velocitat de la llum no està en contradicció amb el principi de relativitat. La composició de dues velocitats més petites que la de la llum condueix sempre a una velocitat inferior a la de la

llum i tampoc es pot modificar la velocitat de la llum per composició amb una altra velocitat.

Comença llavors la part electrodinàmica. Imposant —segons el principi de relativitat— que les equacions de Maxwell s'escriguin de la mateixa manera en dos sistemes de coordenades que es mouen amb moviment relatiu de translació uniforme, dedueix com veuen els camps elèctrics i magnètics dos observadors que es mouen en els sistemes abans esmentats. Estudiant les característiques d'un raig de llum des d'un sistema de coordenades en moviment respecte d'un altre en repòs dedueix l'efecte Doppler, l'aberració, i la teoria de la pressió de radiació exercida sobre un mirall perfecte, així com les equacions de Maxwell-Hertz, tenint en compte la presència de càrregues.

Conclou amb l'estudi de la dinàmica de l'electró lentament accelerat. Quan l'electró està en moviment l'estudia en un sistema de coordenades que es mou amb ell; és a dir en un sistema en què les equacions de moviment són trivials, perquè l'electró no sent el camp magnètic. En expressar aquest resultat en el sistema de coordenades original, amb una elecció no gaire encertada de la força, dedueix les expressions per a la força de Lorentz i per al que s'anomenen *massa longitudinal* i *massa transversal*. Una deducció que, com el mateix Einstein comenta, no està exempta d'arbitrarietats. Planck, un any més tard, després de justificar l'elecció adequada, va obtenir les expressions correctes per a la *massa longitudinal* i la *massa transversal*. Finalment va trobar l'equació per a l'energia cinètica d'un electró de massa μ , que justifica que ha de ser vàlida també per a qualsevol objecte ponderable:

$$W = \mu V^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}. \quad (22)$$

Aquesta relació ens permet lligar aquest treball amb el que se'n considera un apèndix, rebut als *Annalen der Physik* el dia següent a la publicació de l'anterior en què Einstein tracta del que s'ha anomenat *equivalència massa-energia* (Einstein, 1905d).

Uns mesos després del seu treball sobre relativitat, Einstein escriu a Habicht:²⁶

«Se m'ha acudit una conseqüència del meu article sobre electrodinàmica. El principi de relativitat, conjuntament amb les equacions de Maxwell, requereix que la massa sigui una mesura directa de l'energia continguda en un cos. [...] L'argument és divertit i atractiu; però no podria dir si el Senyor s'està rient d'això o està fent broma.»

²⁶Einstein a Conrad Habicht, final de juny-final de setembre de 1905, citat a Stachel, pàg. 269 (1989).

La idea que la massa inercial estigués associada amb energia electromagnètica havia estat força discutida abans de 1905. En particular hi havia hagut diversos intents d'associar tota la massa inercial de l'electró amb el seu camp electromagnètic. Però el que Einstein defensava en el seu primer treball sobre el tema és que, com a conseqüència del principi de relativitat, la massa inercial estava associada a *totes* les formes d'energia. En el seu treball de 1905 ho va demostrar per processos amb emissió de radiació electromagnètica, però va argumentar que el procés havia de ser independent del mecanisme pel qual el sistema perd energia. De fet el que va demostrar és que canvis en l'energia estan associats a canvis en la massa inercial iguals als canvis en l'energia dividit per c^2 .

Passem ara a comentar de manera succinta l'impacte d'aquests treballs.²⁷ L'acceptació de la relativitat va ser desigual. Compararem el cas de tres països amb una resposta força diferent: Alemanya, Gran Bretanya i França.

A Alemanya la teoria va ser aviat discutida, analitzada i desenvolupada pels físics alemanys, òbviament en diferent grau i no sempre interpretada de manera correcta. Planck, Max von Laue (1879–1960) i Jakob Laub (1882–1962) van ser-ne tres grans impulsors i van aconseguir que la teoria s'imposés de manera més ràpida. Planck es va convertir en un ardent defensor de les idees d'Einstein fins i tot quan els resultats experimentals de Kaufmann semblava que contradieien les prediccions einsteinianes. Planck, com hem dit, va corregir les expressions per les masses longitudinals i transversals d'Einstein i va demostrar que la seva teoria també es mostrava d'acord amb els resultats de Kaufmann. Un altre mèrit de Planck va ser el d'atreure el jove i brillant físic Von Laue cap a l'estudi de la teoria. Al marge d'algunes contribucions a la teoria de la relativitat, es deu a Von Laue el primer llibre dedicat íntegrament a aquesta teoria: *Das Relativitätsprinzip* (1911), que va contribuir d'una manera decisiva a la difusió i comprensió de la teoria d'Einstein en els països de llengua alemanya.

La resposta a la Gran Bretanya va ser, en canvi, força negativa. Es podria definir com una reacció defensiva cap al que es va percebre com un atac frontal a l'èter, concepte en què es basava gran part de la física britànica. De fet s'ha de puntualitzar que aquesta actitud va ser defensiva quan es va donar, és a dir, que en molts casos els físics britànics ni tan sols coneixien la teoria d'Einstein. O si n'havien sentit a parlar, n'ignoraven els detalls.

A França la situació va ser força singular. Només Paul Langevin, ja el 1906, va apreciar el valor de la teoria de la relativitat especial, en què reconeixia a més una extensió dels seus treballs sobre la teoria de l'electró.

²⁷Per a més detalls sobre el primer impacte de la relativitat einsteiniana, vegeu, per exemple, Sánchez Ron (1985).

Langevin va ensenyar relativitat especial al seu curs del College de France al qual van assistir Bauer, Becquerel, Borel, Hadamard i Elie Cartan, alguns dels quals van contribuir més tard al desenvolupament i a la difusió de la teoria. És extremament difícil trobar cap referència a Einstein per part d'altres científics francesos. La situació va començar a canviar al voltat de 1919, però entre 1905 i 1912 Poincaré, la figura més destacada de l'electrodinàmica francesa, no es va referir mai a Einstein en aquest context. És difícil que Poincaré no hagués llegit el treball d'Einstein de 1905, tot i que és possible que el considerés com a part de les seves contribucions. La influència de la imponent figura de Poincaré és una de les raons que s'esgrimeix per explicar la poca atenció als treballs d'Einstein per part dels físics francesos. Però un altre factor podria ser de caràcter polític i estar relacionat amb els conflictes entre França i Alemanya

que el 1914 van conduir a la Primera Guerra Mundial. Som conscients que aquesta breu exposició de les aportacions d'Einstein el 1905, encara sense oblidar el context en el qual es van produir, no és suficient per captar la senzillesa i la profunditat amb què un jove desconegut de 26 anys irromp en el camp de la investigació en física teòrica a començaments del segle XX. Els articles que hem comentat són de lectura relativament fàcil, tant per l'estil com pel contingut. És per això que, tenint en compte les facilitats que hi ha actualment per consultar directament aquesta part inicial de l'obra einsteiniana, remetem el lector interessat als textos originals.²⁸ Som entre els que pensem que caldria reivindicar amb força una major lectura dels clàssics de la ciència. Si es practica, una agradable sorpresa és segura. Aquesta pot ser una bona ocasió per comprovar-ho.

Bibliografia

- BARTHOLOMEW, J. D., *Stochastic models for social processes*, J. Wiley (London, 1982). Primera edició, 1973.
- BECK, A., *The collected papers of Albert Einstein, vol. 1. The Early years, 1879–1902*, English translation. Princeton University Press (Princeton, 1987).
- BECK, A., *The collected papers of Albert Einstein, vol. 2. The Swiss years: writings, 1900–1909*, English translation. Princeton University Press (Princeton, 1989).
- BECK, A., *The collected papers of Albert Einstein, vol. 3. The Swiss years: writings, 1909–1911*, English translation. Princeton University Press (Princeton, 1993).
- BECK, A., *The collected papers of Albert Einstein, vol. 5. The Swiss years: correspondence, 1902–1914*, English translation. Princeton University Press (Princeton, 1995).
- BOHR, N., KRAMERS, H. A. i SLATER, C., The quantum theory of radiation, *Philosophical Magazine*, **47**, 785–822 (1924). Reproduït a Van der Waerden, 159–176 (1967).
- BRUSH, S. G., *The kind of motion we call heat. A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*, 2 vol. North-Holland (Amsterdam, 1976).
- DARRIGOL, O., Henri Poincaré's Criticism of Fin De Siècle Electrodynamics, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **26**, **1**, 1–44 (1995).
- EINSTEIN, A., Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen, *Annalen der Physik*, **4**, 513–523 (1901). Traducció anglesa a: Beck, 1–11 (1989).
- EINSTEIN, A., Ueber die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissociirten Lösungen ihrer Salze und über eine elektrische Methode zur Erforschung der Molecularkräfte, *Annalen der Physik*, **8**, 798–814 (1902a). Traducció anglesa a: Beck, 12–29 (1989).
- EINSTEIN, A., Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, *Annalen der Physik*, **9**, 417–433 (1902b). Traducció anglesa a: Beck, 30–47 (1989).
- EINSTEIN, A., Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik, *Annalen der Physik*, **11**, 170–187 (1903). Traducció anglesa a: Beck, 48–67 (1989).
- EINSTEIN, A., Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme, *Annalen der Physik*, **14**, 354–362 (1904). Traducció anglesa a: Beck, 68–77 (1989).
- EINSTEIN, A., Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, **17**, 132–148 (1905a). Traducció anglesa a: Beck, 86–103 (1989). Traducció catalana a: Einstein, 7–25 (1998).
- EINSTEIN, A., Über die von molekular-kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik*, **17**, 549–560 (1905b). Traducció anglesa a: Beck, 123–134 (1989). Traducció catalana a: Einstein, 27–39 (1998).

²⁸A Einstein (1998) es pot trobar una traducció al català dels articles aquí comentats, excepte del segon sobre relativitat. Els dos sobre relativitat, traduïts al català i comentats, es poden consultar a Einstein (2000).

- EINSTEIN, A., Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, **17**, 891–921 (1905c). Traducció anglesa a: Beck, 140–171 (1989). Traducció catalana a: Einstein, 41–77 (1998).
- EINSTEIN, A., Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig, *Annalen der Physik*, **18**, 639–641 (1905d). Traducció anglesa a: Beck, 172–174 (1989). Traducció catalana a: Einstein, 119–121 (2000).
- EINSTEIN, A., Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Annalen der Physik*, **19**, 289–305 (1906). Traducció anglesa a: Beck, 104–122 (1989).
- EINSTEIN, A., Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Annalen der Physik*, **34**, 591–592 (1911). Traducció anglesa a: Beck, 336–337 (1993).
- EINSTEIN, A., *Einstein en català*, Traducció d'Oliver Strunck i de Xavier Roqué. Edicions de la Revista de Física (Barcelona, 1998).
- EINSTEIN, A., *Albert Einstein. La teoria de la relativitat i altres textos*. Introducció, traducció i notes de Xavier Roqué. Institut d'Estudis Catalans (Barcelona, 2000).
- FÜRTH, R. (ed.), *Albert Einstein. Investigations on the theory of the Brownian movement*, Dover (New York, 1956). Versió original alemanya, 1926.
- GIBBS, J. W., *Elementary principles in statistical mechanics*, Yale University Press (Yale, 1902). Reimprès per Ox Bow Press (Woodbridge, Connecticut, 1981).
- KLEIN, M. J., KOX, A. J., SCHULMANN, R. (ed.), *Albert Einstein. Collected papers 5. The Swiss years: correspondence, 1902–1914*, Princeton University Press (Princeton, 1993).
- LANGEVIN, P., Sur la théorie du mouvement brownien, *Comptes Rendus Académie de Sciences (Paris)*, **146**, 530–533 (1908).
- NAVARRO, L., *Einstein, profeta y hereje*, Tusquets (Barcelona, 1990).
- NAVARRO, L., Gibbs, Einstein and the foundations of statistical mechanics, *Archive for History of Exact Sciences*, **53**, 147–180 (1998).
- NAVARRO, L. i PÉREZ, E., Paul Ehrenfest on the necessity of quanta (1911): discontinuity, quantization, corpuscularity and adiabatic invariance, *Archive for History of Exact Sciences*, **58**, 97–141 (2004).
- PAIS, A., *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Ariel (Barcelona, 1984). Versió original anglesa, 1982.
- POINCARÉ, H., Le mesure du temps, *Revue de Métaphysique et de Morale*, **6**, **1**, 1–13 (1898).
- POINCARÉ, H., Sur la dynamique de l'électron, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, **140**, 1504–1508 (1905).
- POINCARÉ, H., Sur la dynamique de l'électron, *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, **21**, 129–166 (1906).
- SÁNCHEZ RON, J. M., *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Universidad (Madrid, 1985).
- SCHILPP, P. A., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist.*, (The Library of Living Philosophers). The Open Court (La Salle, Illinois, 1970). Primera edició, 1949.
- SMOLUCHOWSKI, M. von, Zur kinetischen Theorie of Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen, *Annalen der Physik*, **21**, 756–780 (1906).
- STACHEL, J. (ed.), *Albert Einstein. Collected papers, vol. 2. The Swiss years: writings, 1900–1909*, Princeton University Press (Princeton, 1989).
- STACHEL J., *Einstein from "B" to "Z"*, Birkhäuser, (Boston, 2002).
- VAN DER WAERDEN, B. L. (ed.), *Sources of quantum mechanics*, North-Holland (Amsterdam, 1967).
- WAX, N. (ed.), *Selected papers on noise and stochastic processes*, Dover (New York, 1954).