



# Teoria microscòpica del magnetisme de Langevin\*

Josep Olivella Busoms<sup>†</sup>

## Introducció

Durant aquest any se celebra el centenari d'un dels moments clau en la història de la física. Fou durant l'any 1905 que un científic fins aleshores desconegut presentà cinc articles que canviarien en gran manera la visió que es tenia fins llavors de la física. Parlem d'Albert Einstein, que, en el seu *annus mirabilis*, publicà en la prestigiosa revista alemanya *Annalen der Physik* un seguit d'articles que el feren mereixedor d'ocupar un lloc privilegiat en la història de la ciència del segle XX.

Les casualitats de la història també fan que durant aquest any se celebri el centenari d'una teoria sobre el magnetisme que formulà el físic francès Paul Langevin. A part del magnetisme, un dels camps de recerca de Langevin durant l'inici del segle XX era la teoria electromagnètica de la matèria, idea àmpliament estesa en aquells moments. En aquest context, Langevin publicà durant el mes de març de 1905 un article en el qual analitzava el problema de la radiació i de la inèrcia electromagnètica. En aquest article conclou que la teoria electromagnètica de la matèria s'ha de prendre com a eix fonamental del qual es deriven les lleis de la mecànica. Els seus càlculs mostren de manera explícita que la massa d'un electró és proporcional a l'energia, més concretament al quadrat de la velocitat de la llum. Si deixem de banda la diferència en el significat dels conceptes de massa i de energia es podria dir que Langevin, d'una manera totalment independent, arriba als resultats que Einstein publicà en el seu article sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment. Quan Langevin s'assabentà dels treballs d'Einstein, inicialment dubtà que els resultats obtinguts per aquest fossin tan generals com els seus.

El que podia ser un punt de fricció entre ambdós es convertí després de la seva trobada al primer Congrés Solvay de 1911 en una llarga amistat que mantingueren durant tota la seva vida. Langevin va ser el principal divulgador de les teories d'Einstein a França i va esdeve-

nir el seu gran defensor i avalador davant l'exclusió dels científics alemanys de les diverses reunions científiques després de la Primera Guerra Mundial.

En aquest article es pretén analitzar el model que Langevin presentà aquest any 1905 sobre el magnetisme. Sovint s'insinua que aquesta teoria inclou, de manera més o menys encoberta, hipòtesis de natura quàntica, fet que una anàlisi detallada de la teoria desmenteix; el model de Langevin es desenvolupa en el si de la física clàssica, si bé és cert que hi adopta certes aproximacions.

## Paul Langevin: la persona i el científic<sup>1</sup>

Paul Langevin nasqué a París l'any 1872. La seva formació acadèmica el portà a l'École de Physique et Chimie de París, on esdevingué alumne de P. Curie, fet que el marcà de manera molt clara en la seva tasca investigadora posterior. Durant la seva formació en el període anterior a 1897, seguí els cursos de Poincaré sobre electromagnetisme, teories moleculars i interpretació estadística del principi de Carnot. També seguí els cursos de Brillouin sobre teoria cinètica.

L'any 1897 se'n va anar Anglaterra a fer una estada per ampliar els estudis; concretament al Laboratory Cavendish, centre neuràlgic de la teoria electromagnètica en aquells moments. A Cambridge va entrar en contacte amb Wilson, Townsed, Rutherford i amb J. J. Thomson, el qual, el mateix any, va mesurar la velocitat dels electrons. Langevin estudià la natura dels raigs catòdics, la seva càrrega i velocitat. La recerca que dugué a terme el portà a analitzar les relacions entre la matèria i l'electricitat amb la idea de buscar alguna manera d'articular els conceptes de la mecànica i de l'electromagnetisme. La seva estada va ser cabdal en la gènesi de les idees que Langevin va adoptar en relació amb la constitució de la matèria i sobre la necessitat de reformular la mecànica i la física en general, en termes exclusivament electromagnètics.

Quan tornà a França, Langevin tingué un paper important en la introducció de les idees electròniques al país i això l'apropà a Poincaré, un dels impulsors de la teoria dels electrons com a nexa d'unificació de la física.

<sup>1</sup>Una àmplia i excel·lent biografia la trobem a Bensaude-Vincent, B., Langevin, Science et Vigilance, Belin (París, 1987).

\*Es pot trobar una anàlisi més detallada des del punt de vista historiogràfic de la teoria de Langevin a L. Navarro (1997).

<sup>†</sup>Josep Olivella Busoms (Berga, 1969) és llicenciat en Física per la Universitat de Barcelona (1993). Actualment és professor d'ensenyament secundari a l'IES Llobregat de Sallent.



GOLDSCHMIDT    PLANCK    RUBENS    LINDEMANN    HASENOHRL  
NERNST    BRILLOUIN    SOMMERFELD    DE BROGLIE    HOSTELET  
SOLVAY    LORENTZ    KNUDSEN    HERZEN    JEANS    RUTHERFORD  
WARBURG    WIEN  
PERRIN    Madame CURIE    POINCARÉ    KAMERLINGH ONNES    EINSTEIN    LANGEVIN

Figura 1: Primer Congrés Solvay (Brussel·les, 1911)

Langevin i Poincaré foren convidats a fer una conferència al Congrés de Saint Louis de 1904. Langevin hi mostrà de manera molt clara tots els elements essencials del seu pensament sobre l'estructura de la matèria (Parra, 2004, 47–48; Langevin, 1904, 195–212).

Durant l'any 1905, Langevin publicà dotze articles en els quals segueix dues línies de treball. En una analitza la teoria electromagnètica de Lorentz. Partint de la base de les seves creences sobre l'estructura de la matèria, Langevin estudia l'origen electromagnètic de la massa, fet que el porta a resultats equivalents en certa manera als resultats a què arriba A. Einstein. En la segona línia de recerca, Langevin, partint dels treballs duts a terme per Curie, i basant-se de nou en el seu pensament sobre l'estructura de la matèria, planteja una teoria per tal d'explicar el magnetisme.

Al llarg de la seva carrera com a científic s'ocupà d'altres temes. Així, esdevingué un gran defensor i divulgador de la relativitat, tant especial com general, d'Albert Einstein, al qual l'uní una profunda amistat. També s'ocupà del problema del moviment brownià i introduí, al model plantejat per Einstein, una força aleatòria. Un dels altres temes d'estudi va ser el fenomen de la piezoel·lectricitat i dels ultrasons, problemes que van fer que Langevin ocupés un lloc important en els esforços de guerra durant la Primera Guerra Mundial. En el transcurs de la seva recerca, Langevin inventà el sonar com

a dispositiu de detecció submarina. Durant la seva trajectòria científica, mai abandonà la física més experimental. Així es preocupà de dissenyar i construir diferents aparells: dispositius per mesurar diferències de pressió en líquids, bancs piezoelèctrics per equilibrar rotors, etc. (Langevin, 1950).<sup>2</sup>

A escala internacional, la seva tasca va ser reconeguda amb catorze nominacions al Premi Nobel de Física en el període 1910-37. L'any 1929 va ser nominat per científics com ara P. Ehrenfest i W. J. de Haas juntament amb Perrin, la qual cosa fa pensar que l'objecte de la nominació era reconèixer la feina d'ambdós en l'explicació del magnetisme.

La tasca de Langevin el portà a participar de manera activa en els congressos Solvay dels quals arribà a ser-ne editor i president des de l'any 1930 amb motiu del 6è Congrés, centrat en el magnetisme.

A banda del vessant com a científic, Langevin es mostrà molt preocupat pel sistema educatiu francès, en especial per la manera en què s'ensenyaven les ciències. Aquest vessant pedagògic és molt reconegut a França, ja que la seva manera de veure les coses va fer canviar aspectes cabdals en l'ensenyament.

Durant la Segona Guerra Mundial va ser empresonat, a causa de les seves idees polítiques, per les tropes

<sup>2</sup>En aquest llibre es pot trobar la cronologia dels diferents treballs de Langevin, així com un recull d'algun d'ells.



A. RICCARD W. GERLACH C. DARWIN P.A. DIRAC

E. HENRIOT	MANNEBACK	H.A. KRAMERS	J.H. VAN VLECK W. HEISENBERG
E. HERZEN	J. VERSCHAFFELT A. COTTON	J. ERRERA O. STERN	H. BAUER P. KAPITZA L. BRILLOUIN P. DEBYE W. PAULI J. DORFMAN E. FERMI
T.H. DE DONDER	P. ZEEBMAN P. WEISS A. SOMMERFELD	Mme CURIE P. LANGEVIN A. EINSTEIN O. RICHARDSON S. CABRERA N. BOHR W.J. DE HAAS	

Absents : C.E. GUYE et M. KNUDSEN

Figura 2: Sisè Congrés Solvay (Brusselles, 1930)

alemanyes. Finalment va morir a París el desembre de 1946.

### Idees sobre les propietats magnètiques de la matèria abans de 1905

El magnetisme és un dels temes que més s'han resistit a una explicació teòrica partint de principis generals. Fins a la fi del segle XIX no es tenen resultats experimentals amplis, metòdics i finals, i aquest fet implica que els primers tractaments teòrics amb cert grau de generalitat que pretenen donar una explicació coherent al fenomen no sorgeixin fins al segle XX. No obstant això, durant el segle XIX aparegueren algunes idees que van ser cabdals en el model que presentà Langevin durant l'any 1905 i a les quals el mateix autor es va referir explícitament en la formulació de la seva teoria.

La primera idea a la qual cal fer referència la formula A. M. Ampère l'any 1820. Estimulat pel recent descobriment de H. C. Oersted sobre els efectes magnètics dels corrents elèctrics, introdueix la idea que en l'interior dels imants naturals hi ha corrents elèctrics moleculars tancats, els quals són responsables de la propietat magnètica que presenten els imants. Aquesta idea, convenientment adaptada, tindrà un paper central en la teoria de Langevin.

M. Faraday, cap a l'any 1845, estava totalment convençut que el magnetisme era una propietat general de la matèria. Per tal de posar-ho de manifest va fer múltiples i variats experiments tractant de detectar i mesurar fins la més petita perturbació exercida per camps magnètics

intensos sobre diferents cossos suspesos lliurement. En particular es va trobar amb un efecte sorprenent. Un tros allargat de vidre, suspès entre dos pols d'un potent imant, tendia a situar-se en posició transversal a les línies de força magnètica; exactament al contrari del que succeïa en una barra de ferro que tendia a la posició longitudinal.

Experimentant amb diferents substàncies, Faraday va observar que totes reaccionaven davant d'un camp magnètic intens; unes com el ferro, les quals anomenà *paramagnètiques*, i altres com el vidre o el bismut, que denominà *diamagnètiques*. Per tal d'explicar aquest comportament diferent de la matèria sota l'acció dels camps magnètics, Faraday introduí el concepte de *línies de força*.

Al voltant de 1850, per explicar el diamagnetisme, Weber va afegir una nova idea *ad hoc* a la hipòtesi general d'Ampère. Weber va suposar que els circuits elèctrics tancats que va introduir Ampère presentaven una resistència òhmica nul·la. D'aquesta manera, el corrent elèctric hi podia circular indefinidament sense pèrdua d'energia i, per tant, podia explicar el caràcter permanent del fenomen diamagnètic.

Per Weber l'efecte diamagnètic consisteix en l'aparició de corrents induïts pel camp magnètic en aquells circuits moleculars sense resistència, encara que amb autoinducció. En les substàncies paramagnètiques, al contrari, hi ha corrents elèctrics permanents en el si de la matèria. El camp magnètic tendeix a orientar aquests corrents en la direcció del camp. D'aquesta manera,

segons el model de Weber, el paramagnetisme i el diamagnetisme són efectes independents i contraposats, si bé en les substàncies paramagnètiques el primer, per la seva major intensitat, emmascara totalment el segon.

A. Ewing va observar l'any 1890 que en la magnetització del ferro apareixen aspectes que sembla que indiquen una influència mútua entre diferents parts del material. Aquesta idea, convenientment modificada, va ser recollida per P. Weiss per tal d'explicar el ferromagnetisme en termes d'un fenomen col·lectiu que apareixia entre les diferents molècules del material.

Un altre esglaó que ens condueix al fet que Langevin pugui formular el seu model el trobem en les idees de W. Voigt i J. J. Thomson, els quals, de manera independent, van introduir a principi del segle XX la idea que el magnetisme de la matèria estava causat per electrons en moviment.

Thomson, aplicant les equacions de Maxwell al moviment dels electrons, suposant que aquests presentaven un amortiment proporcional a la velocitat, va poder explicar el paramagnetisme. El diamagnetisme seria el reflex dels efectes d'autoinducció provocat pel moviment dels electrons sobre ells mateixos.

Voigt, a part de responsabilitzar el moviment dels electrons del magnetisme de la matèria, introduïa nous elements. Així, suposava que els electrons giraven sobre ells mateixos i a la vegada col·lidien entre ells. Les substàncies es mostraven paramagnètiques o diamagnètiques segons que els electrons adquirissin, immediatament després de l'impacte, un excés mitjà d'energia potencial o cinètica. Per ell, el diamagnetisme i el paramagnetisme sorgien de la mateixa causa.



Figura 3: Pierre i Marie Curie el 1895 (Arxius Curie i Joliot-Curie)

Finalment, i això no vol dir que sigui la contribució menys important, cal parlar de la influència de P. Curie. Resulta difícil exagerar la importància de les aportacions de P. Curie al desenvolupament del magnetisme modern així com de la influència que exercí sobre Paul Langevin. Curie fou professor seu a l'École de Physique et de Chimie Industrielles de París i sota la seva tutela desenvolupà la seva faceta de físic experimental, que madurà durant la seva estada al Cavendish Laboratory.

L'any 1895, P. Curie va publicar els resultats de les seves múltiples i metòdiques experiències dissenyades per determinar amb precisió les propietats magnètiques de diferents cossos, dins d'un ampli ventall de variació de temperatures i camps magnètics. Després de superar un gran nombre de dificultats experimentals va aconseguir posar de manifest certes característiques del comportament magnètic de la matèria, fet que li va permetre classificar-la en tres grans grups: els materials *diamagnètics*, els *paramagnètics* i els *ferromagnètics*.

Al llarg dels seus treballs, Curie va aconseguir demostrar que una substància ferromagnètica, en augmentar suficientment la temperatura, acabava per adquirir plenament les propietats de les substàncies magnètiques, amb la qual cosa es verificava per a aquestes l'anomenada des d'aleshores *lleï de Curie*. També va concloure que el diamagnetisme, sempre un efecte dèbil comparat amb el paramagnetisme, és un fenomen diferent dels anteriors i, en general, independent de la temperatura.

### El model de Langevin: hipòtesis i resultats

L'aportació de Langevin al magnetisme es pot trobar en tres articles publicats al llarg de l'any 1905. En el primer (Langevin 1905a), per ordre cronològic, Langevin avançà esquemàticament la major part de les idees centrals que aparegueren el maig de 1905 en el seu extens i famós treball on presenta una explicació microscòpica del diamagnetisme i del paramagnetisme, d'acord amb els resultats experimentals de Curie (Langevin, 1905b). En el darrer trimestre del mateix any publicà un tercer article en què, a més de ressaltar les idees essencials de la seva teoria del magnetisme, incloïa al final un lleuger comentari sobre possibles vies d'avanç en l'explicació del ferromagnetisme, d'acord amb una línia ja apuntada per P. Weiss, al qual es refereix explícitament (Langevin, 1905c).

#### Hipòtesis generals

Des de bon començament, Langevin exposa clarament l'adopció de la idea que la matèria està constituïda per electrons en moviments periòdics estables, adequadament descrits per la teoria de Lorentz. Considera que la matèria conté dos tipus d'electrons: uns corpuscles negatius (que són els corpuscles descoberts per J. J. Thomson) i uns de positius, de manera que el moviment dels electrons en el si de la matèria és estable.

La proposta de Langevin consisteix a assimilar el mo-

viment d'aquests electrons en òrbites tancades amb els corrents moleculars d'Ampère. La reacció per inducció contra la creació del camp magnètic extern donarà lloc al diamagnetisme i l'orientació de les òrbites sota la influència del camp i de l'agitació tèrmica explicarà el paramagnetisme; tot això, molt en la línia ja avançada per Voigt i Thomson.

Si a un electró de càrrega  $e$ , que descriu una òrbita tancada de superfície  $S$ , amb un període  $T$ , s'hi apliquen les lleis de Maxwell, s'obté un resultat cabdal per a la teoria de Langevin. L'electró en moviment resulta equivalent, des del punt de vista de les accions magnètiques, a un imant elemental de moment magnètic normal al pla de l'òrbita donat per:  $M = eS/T$ . Així doncs, els corrents moleculars d'Ampère s'assimilen a electrons movent-se en òrbites periòdiques i estables que, al seu torn, són equivalents a imants elementals perpendiculars al pla de l'òrbita.

Aquesta idea cabdal ens porta a l'escenari idoni per tal d'explicar el diamagnetisme i el paramagnetisme. Independentment del resultat de la superposició dels moments magnètics elementals associats als electrons moleculars en moviment, l'aparició d'un camp magnètic extern en modificarà la distribució, i això donarà lloc a una propietat general de la matèria: el diamagnetisme. Al contrari, el paramagnetisme només es manifestarà en molècules que tenen un moment magnètic resultant no nul i és reflex de la tendència de tot imant a orientar-se en la direcció del camp magnètic aplicat, malgrat l'agitació tèrmica que tendeix a desordenar el sistema.

Aquesta explicació d'ambdós fenòmens sobre la base de causes diferents implica que no pot existir cap transició entre el diamagnetisme i el paramagnetisme, tal com indiquen les conclusions de P. Curie.

### El diamagnetisme

L'aplicació de les lleis de Maxwell permet a Langevin deduir la influència d'un camp magnètic extern  $H$  sobre el moviment dels electrons en les seves respectives òrbites. El resultat és que cada corrent molecular associat a un electró, de càrrega  $e$  i massa  $m$ , experimenta una variació mitjana del seu moment magnètic donada per:

$$\Delta H = -\frac{He^2}{4m} \langle r^2 \rangle,$$

on  $r$  representa la distància del centre de gravetat de la molècula a l'electró, considerant el moviment d'aquest en la seva òrbita projectada sobre una pla perpendicular al camp magnètic;  $\Delta H$  representa una variació perpendicular a l'òrbita.

La quantitat anterior, negativa per a qualsevol corrent associat a electrons negatius o positius, és la que serveix a Langevin per explicar l'efecte diamagnètic com a propietat molecular general, atès que no depèn del fet que el moment magnètic inicial de la molècula sigui nul o no; i tampoc depèn de la temperatura.



Figura 4: Paul Langevin

Cal ressaltar que el càlcul que condueix a l'equació anterior no necessita hipòtesis addicionals; només cal recórrer a una aproximació lineal per als camps externs, justificada en la demostració per la petita variació d'aquests d'un punt a un altre de l'element de volum de la substància considerada. Tan clàssica és la forma de procedir de Langevin per deduir l'equació que, en el fons, bàsicament es fa una adaptació del tractament que ja havia fet J. Larmor anteriorment.

Es pot arribar a la mateixa expressió assignant a cada circuit molecular una resistència òhmica nul·la i de gran autoinducció. Només cal admetre, tal com ho fa Langevin, que la inèrcia de l'electró és d'origen totalment electromagnètic.

És interessant insistir, i Langevin ho fa explícitament, en el fet que la temperatura no té cap paper en el diamagnetisme. Langevin ho justifica per la insensibilitat de les línies espectrals a la temperatura i tracta l'excepció que presenta el bismut sòlid en termes d'electrons lliures.

Com a físic teòric, però a causa de la influència de P. Curie, molt lligat a l'experimentació, Langevin s'ocupa d'obtenir resultats numèrics que es puguin contrastar amb l'experimentació. Això el porta a estimar la mida de les dimensions de les òrbites electròniques entre  $2 \times 10^{-10}$  i  $10^{-8}$  cm, inferiors a les dimensions moleculars admeses en aquells moments, fet que confirmava el caràcter intramolecular dels corrents.

Els conceptes i supòsits que porten Langevin a l'explicació de l'efecte diamagnètic estan inclosos, sense cap excepció, en un marc clàssic. Si en algun moment sembla que el model s'aparta de la interpretació clàssica és només perquè no s'ha tingut en compte algun efecte per la seva repercussió nul·la en els experiments. Langevin

en cap moment s'aparta dels preceptes de l'electrodinàmica maxwelliana ni de la teoria electromagnètica de Lorentz.

El cas de l'estabilitat que pressuposa Langevin de les òrbites electròniques viola aparentment l'electromagnetisme clàssic. És evident que les òrbites completament estables violen les lleis de la física clàssica, ja que l'acceleració centrípeta implica esmorteïment i inestabilitat. Langevin no postula una estabilitat completa, sinó que per ell aquesta tendència a la inestabilitat es compensa amb l'absorció de la radiació tèrmica o bé és extremadament dèbil i, per tant, inobservable.

## El paramagnetisme

Tot seguit Langevin passa a analitzar detalladament l'energia magnètica, és a dir, l'energia involucrada en la modificació dels corrents moleculars per efecte d'un camp magnètic extern. Sempre partint de la hipòtesi de la natura purament electromagnètica de la inèrcia, és a dir de la massa, arriba a la conclusió que els circuits moleculars es poden considerar circuits indeformables, però mòbils. Així, la mobilitat dels corrents moleculars passa a ser un ingredient bàsic en la teoria del magnetisme.

Sota aquest resultat, Langevin considera una molècula d'una substància paramagnètica en el si d'un camp magnètic extern. La seva energia potencial ve donada per  $W = -MH \cos \alpha$ , on  $\alpha$  representa l'angle que forma el moment i el camp aplicat. Aquest moment magnètic, fins i tot tenint en compte la petita variació diamagnètica universal, pot considerar-se invariable i per tant mai s'aparta de l'ortodòxia clàssica.

La tendència del moment a orientar-se en la direcció del camp es veu contrarestada per l'agitació tèrmica associada a la temperatura  $T$ . L'aplicació en aquest cas de la llei de Boltzmann per a l'equilibri tèrmic proporciona la distribució final dels moments magnètics moleculars, cosa que permet a Langevin obtenir per a la magnetització específica  $I$  (moment magnètic per unitat de volum) l'expressió

$$I = MN \left( \frac{\cosh a}{\sinh a} - \frac{1}{a} \right),$$

on  $N$  és el nombre de molècules per unitat de volum i  $a = MH/rT$ ;  $r$  és una constant que més tard es coneixerà amb el nom de *constant de Boltzmann*.

En les situacions experimentals habituals, incloses les de P. Curie,  $a$  pren uns valors suficientment petits enfront de la unitat de manera que queda plenament justificada una aproximació lineal que ens condueix a una susceptibilitat magnètica

$$k = \frac{M^2 N}{3rT},$$

que és precisament l'expressió analítica que dona la llei de Curie per a les substàncies paramagnètiques.

El model també prediu una magnetització de saturació  $I_0 = MN$  en la qual tots els moments moleculars

estan orientats en la direcció del camp. Aquest fet succeeix en el límit de «grans camps» o de «baixes temperatures».

Encara que l'efecte diamagnètic es dona fins i tot en una molècula aïllada, no succeeix el mateix en el cas del paramagnetisme. Aquest no és un fenomen col·lectiu en el sentit de traduir els resultats d'una certa acció entre molècules properes, però perquè l'efecte paramagnètic tingui lloc en una situació d'equilibri tèrmic, cal necessàriament algun mecanisme d'intercanvi d'energia entre les molècules per tal de mantenir l'equilibri.

A partir de les dades experimentals de P. Curie, Langevin obté per a l'oxigen, una substància paramagnètica, un resultat sorprenent, inexplicable a partir de les hipòtesis inicials sobre les quals es construeix la teoria. Langevin posa de manifest que s'obté un alt grau de coherència amb les dades experimentals si s'admet que tot el moment magnètic d'una molècula d'oxigen prové d'un sol electró, que tot indica que és un electró perifèric. És com si tota la resta de corrents moleculars es neutralitzessin entre ells.

Per acabar el seu ampli treball de 1905 sobre el magnetisme, Langevin apunta, sense entrar en detalls, que l'explicació del ferromagnetisme necessita hipòtesis addicionals a les que ell ha considerat.

## Conclusions

A l'hora de formular el seu model, Langevin es mou sempre en el si de l'ortodòxia de la física clàssica, és a dir, de l'electromagnetisme de Maxwell i de la teoria electromagnètica de Lorentz. Això no ens ha de sorprendre en absolut, ja que durant la seva estada a Cambridge Langevin quedà plenament imbuït de la dinàmica existent aleshores, dinàmica segons la qual tota la física es podia formular totalment en termes de l'electromagnetisme.

Seguint aquesta idea Langevin creia que la matèria està formada per electrons tant negatius com positius i que, concretament, l'àtom estava format per un gran nombre d'electrons, de l'ordre de 1.000 vegades el seu pes atòmic, tal com consta expressament en la seva tesi doctoral. Langevin també creia, d'acord amb una idea bastant difosa en aquells moments, que tota la massa dels electrons, i per tant de la matèria, té un origen electromagnètic. Aquest camí el féu arribar a resultats que com ja hem dit són equivalents als que obtingué A. Einstein. A l'hora de desenvolupar el seu model sobre el magnetisme, Langevin utilitza clarament tot allò en què creu fermament. D'una banda, considera que la matèria està formada per electrons i que aquests es mouen seguint òrbites tancades, les quals associa als corrents que Ampère introduí en el segle XIX com a responsables del magnetisme. També utilitza la idea de la inèrcia electromagnètica per justificar que els circuits siguin de resistència nul·la i de gran autoinducció.

Partint de les seves idees sobre la constitució de la



Figura 5: Paul Langevin i Albert Einstein el 1922

matèria i del comportament dels electrons, Langevin obté una teoria que permet explicar el diamagnetisme i el paramagnetisme i que permet diferenciar clarament entre els dos fenòmens. Per Langevin el diamagnetisme i el paramagnetisme són propietats totalment independents i per tant no hi pot haver cap transició entre l'un i l'altre. En el seu model, el diamagnetisme és una propietat inherent a la matèria, independent de la temperatura, i d'una magnitud molt petita, mentre que el paramagnetisme només apareix en aquella matèria que ja presenta moments magnètics no nuls i que sota l'acció d'un camp magnètic extern s'orienten a la vegada que l'agitació tèrmica s'oposa a aquest fet. En el cas del paramagnetisme s'assoleix un equilibri tèrmic, que dona com a resultat l'equació de Langevin per al paramagnetisme.

Langevin sempre busca resultats experimentals per tal de comparar la seva teoria i els treballs de P. Curie en constitueixen una base excepcional. El seu model dona compte dels resultats de Curie per al diamagnetisme, fins i tot per al bismut, i permet obtenir la llei de Curie que segueixen els materials paramagnètics.

Analitzant el model de Langevin amb els ulls actuals, és fàcil caure en l'error de pensar que hi apareixen hipòtesis alienes a la física clàssica. Langevin pressuposa l'estabilitat de les òrbites, quan és evident que, segons l'electromagnetisme clàssic, han de ser inestables. Langevin, en fer-ho, no abandona mai l'ortodòxia clàssica. Per ell, aquesta tendència a la inestabilitat es compensa amb l'absorció de la radiació tèrmica o bé és extremament dèbil i, per tant, inobservable. Thomson ja va avançar aquesta idea l'any 1903, el qual havia demostrat

que en el moviment de partícules carregades, igualment separades i en rotació uniforme seguint una òrbita circular, si la velocitat de gir és petita comparada amb la de la llum, la radiació emesa per partícula disminueix en augmentar el nombre de partícules. Tal com hem dit, Langevin participava d'aquesta idea, i per tant no ens ha de sorprendre que per ell la inestabilitat de les òrbites no sigui un problema.

Pel que fa a la permanència del moment magnètic en el cas del paramagnetisme tampoc significa trencar amb la tradició clàssica. Langevin reconeix explícitament una petita variació en el moment a causa de la propietat universal que és el diamagnetisme, però és una aproximació justificada, deguda a la petita modificació que comporta el fenomen diamagnètic.

Tot i que el model de Langevin donà compte del diamagnetisme i del paramagnetisme, i serví com a punt de partida en la formulació de la teoria del ferromagnetisme proposada per P. E. Weiss l'any 1907, anàlisis posteriors demostraren que el model no era correcte. L'any 1919, J. H. van Leeuwen va demostrar amb tot el rigor quelcom que ja N. Bohr havia anticipat en la seva tesi doctoral de l'any 1911: la impossibilitat de fonamentar el magnetisme de la matèria exclusivament en termes de l'electromagnetisme clàssic i de la mecànica estadística de Maxwell-Boltzmann. Van haver de passar uns quants anys fins que Debye, l'any 1924, introduí amb rigor alguna consideració quàntica en la teoria de Langevin; concretament la quantificació de la direcció del moment magnètic molecular per aplicació de les regles de Sommerfeld.

## Bibliografia

- LANGÉVIN, P., *Oeuvres scientifiques*, CNRS (París, 1950).
- LANGÉVIN, P., *Physics for a New Century. Papers Presented at the 1904 St. Louis Congress*, «The relations of Physics of Electrons to Other Branches of Science», 195–230, SOPKA, K. R. (ed.), Tomash (Los Angeles, 1986).
- LANGÉVIN, P., Sur la théorie du magnétisme, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **139**, 1204–1207 (1905a).
- LANGÉVIN, P., Magnétisme et théorie des électrons, *Annales de Chimie et de Physique*, **5**, 70–127 (1905b).
- LANGÉVIN, P., Sur la théorie du magnétisme, *Journal de Physique*, **4**, 78–693 (1905c).
- NAVARRO, L. i OLIVELLA, J., On the nature of the hypotheses in Langevin's Magnetism, *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, **47**, 316–345 (1997).
- PARRA, J. M., El Congrès de les Arts i la Ciència de Saint Louis. Setembre de 1904, *Revista de Física*, **26**, 42–53 (2004).