

EL MAGNETISME DE LANGEVIN

Luis Navarro Veguillas; Josep Olivella Busoms

Departament de Física Fonamental. Universitat de Barcelona

Paraules clau: *Magnetisme, mecànica quàntica, moment magnètic, estabilitat, permanència, diamagnetisme, paramagnetisme*

Langevin's Magnetism

Abstract: In this paper we analyse the magnetic model proposed by P. Langevin in 1905. In this model, Langevin uses the concept of electron in order to account for the magnetic properties of materials (dia and paramagnetism) in terms of "molecular currents". We are specifically interested in studying the stability of that model and the permanence of the magnetic moments usually associated with Langevin's theory of paramagnetism.

Key words: Magnetism, quantum mechanics, magnetic moment, stability, permanence, diamagnetism, paramagnetism

Introducció

Si hom dona un cop d'ull als textos moderns de mecànica quàntica (MQ d'ara en endavant), hi ha la possibilitat que quedi amb la impressió que la física clàssica ha de ser substituïda definitivament per una altra disciplina diferent que sembla capaç d'explicar coherentment el món microscòpic. Històricament, però, no cal oblidar que alguns dels resultats que actualment es deriven del formalisme general de la MQ ja foren utilitzats per alguns dels seus creadors, per tal de fer evolucionar la teoria. Un exemple el trobem en *l'estadística de Bose-Einstein* la qual va servir d'inspiració a E. Schrödinger (1887-1961) per formular certes idees centrals de la seva mecànica ondulatoria (Navarro, 1990: 195-205). En el període entre 1900 i 1925, època crucial per entendre la gènesi de la MQ, coexisteixen idees clàssiques juntament amb idees alienes al cos de la física clàssica. L'interrelació conduirà a l'establiment de la MQ cap a finals d'aquest període.

El nostre interès, en concret, s'adreça a l'evolució de les idees al voltant del magnetisme en aquest període de mútues influències. Històricament, hi va haver molts intents anteriors al naixement de la MQ, més o menys reeixits, per tal d'explicar els fenòmens magnètics, intents la inconsistència dels quals quedà palesa quan l'any 1919 J.H.

van Leeuwen¹ va demostrar analíticament quelcom que N. Bohr (1885-1962) ja havia anticipat l'any 1911: la impossibilitat de fonamentar el magnetisme exclusivament en termes de la física clàssica. La història del magnetisme d'inicis del segle XX ha estat en gran mesura "oblidada" pels historiadors, i és davant de tot aquest panorama que neix el nostre interès per aquest tema. Estem convençuts que el seu estudi pot ajudar a comprendre el desenvolupament de les idees que menaren la física quàntica.

Estudiarem les hipòtesis en un model sobre el magnetisme basat en càrregues elèctriques en moviment, l'any 1905 presents en Paul Langevin (1872-1946), i que tindrà un gran impacte posterior ja que serà pres com a punt de partida de molts posteriors. Per exemple el del ferromagnetisme que proposava P. E. Weiss (1865-1940) l'any 1907 (Weiss, 1907).

Certes idees sobre el magnetisme abans de Langevin

Empès per la descoberta duta a terme per H. C. Oersted (1777-1851) l'any 1820 sobre els efectes magnètics dels corrents elèctrics, A. M. Ampère (1775-1836) adoptarà la hipòtesi que en l'interior dels imants naturals existeixen corrents elèctrics (Solovine, 1921: 67):

"en admetant qu'un aimant n'est qu'un assemblage de courants électriques [...] et qui ont lieu dans les plans perpendiculaires à la ligne qui joint les deux pôles de l'aimant [...]".

A conseqüència d'un suggeriment de A. Fresnel (1788-1827) (Pierce, 1962: 120), Ampère considera la idea de corrents elèctrics tancats al voltant de la molècula (Solovine, 1921: 79-80):

"(...) dans ma manière de concevoir l'action magnétique, les courants électriques qui entourent chaque particule d'un aimant formant des circuits fermés"

Neix així, una idea que esdevindrà de gran importància en el desenvolupament de l'explicació del fenomen magnètic proposada per Langevin: responsabilitzar dels efectes magnètics, hipotètics circuits elèctrics existents en el si de la matèria.

M. Faraday (1791-1867) és el primer a introduir, pels volts de l'any 1845, els termes "para" i "diamagnetisme" per tal de diferenciar, respectivament, les substàncies que de manera natural són imants i les altres, que presenten un magnetisme menys marcat que els imants naturals. Faraday, no obstant això, es mostrarà escèptic davant la hipòtesi molecular d'Ampère, i introduirà el concepte de "línees de força" com l'eina que obrirà camí d'explicar el magnetisme (Boato; Moro, 1994: 403).

¹ Tesi doctoral reproduïda parcialment a: Van Leeuwen (1921).

W. E. Weber (1804-1891) adoptarà la hipòtesi molecular d'Ampère i, seguint la idea de Faraday, intentarà explicar què succeeix en les substàncies diamagnètiques que no reaccionen davant un camp magnètic extern tal com ho fa, per exemple, el ferro. En el si d'aquest camp adquireixen un estat magnètic caracteritzat per una susceptibilitat magnètica negativa i de valor absolut molt petit². L'explicació que en dóna Weber és que en l'interior d'aquests materials, per l'acció del camp extern i d'acord a la llei de Faraday, s'indueixen corrents elèctrics de resistència nul·la. Weber també posarà de manifest que el diamagnetisme, degut al seu origen, és una propietat general de la matèria. Els cossos paramagnètics seran aquells que tindran corrents moleculars anteriors a l'aplicació de qualsevol camp, els quals, sota la seva acció, es col·locaran en orientacions definides. El diamagnetisme quedarà, en aquests cossos, emmascarat pel paramagnetisme (Whittaker, 1987: 208-211).

Per la seva relació amb el tema que ens interessa, no podem deixar d'esmentar la contribució de P. Curie (1859-1906) qui, l'any 1895, exposa resultats experimentals que l'impulsen a classificar la matèria, pel que fa al seu comportament magnètic, en tres grans grups. El primer grup el formen les substàncies diamagnètiques, en les quals la susceptibilitat magnètica és negativa i, en valor absolut, molt petita, independent de la temperatura; el segon grup, les substàncies paramagnètiques, on la susceptibilitat, positiva i petita, segueix un comportament inversament proporcional a la temperatura, almenys respecte a les temperatures habituals de laboratori, que Curie resumirà en la coneguda llei que porta el seu nom; finalment es refereix a substàncies ferromagnètiques en les quals la susceptibilitat, també positiva, varia amb la temperatura segons una funció prou complexa i on el valor de la susceptibilitat és molt més gran que no pas els altres dos grups.

Per acabar amb aquesta breu referència a certes idees sobre el magnetisme que poden servir algun lligam amb el model que proposarà Langevin, és necessari esmentar J.J Thomson (1856-1940), el qual, en un article de l'any 1903, emprèn la tasca d'estudiar el magnetisme a partir de la hipòtesi de càrregues elèctriques negatives en moviment (Thomson, 1903). Weber ja havia considerat, pels volts de 1850, l'existència de càrregues elèctriques en moviment com a explicació dels corrents moleculars. Thomson, però, en el seu article, ateny la conclusió que amb la hipòtesi de càrregues elèctriques en moviment, la susceptibilitat magnètica del sistema és nul·la, amb la qual cosa el magnetisme resta inexplicat.

Com a resum final d'aquest brevíssim apunt històric, podem dir que quan arribem al canvi de segle no hi ha cap teoria prou coherent i acceptada que expliqui les propietats magnètiques de la matèria.

El model de Langevin

Desde de les darreries de 1904 a les de 1905, Langevin publica tres articles on exposa la seva teoria cinètica del magnetisme. En el primer (Langevin, 1904) l'autor fa un

²Per susceptibilitat magnètica s'entén el quocient entre la magnetització adquirida per unitat de volum i el camp magnètic aplicat quan aquest és molt petit.

avanç del que serà el seu article cabdal publicat el maig de 1905 (Langevin 1905a) als *Annales de Chimie et Physique* i en el qual exposa el seu model teòric per donar compte tant del "dia" com del "paramagnetisme". Finalment, en un article que porta la data d'octubre de 1905 (Langevin, 1905b), ultra seguir les pautes marcades en el treball de maig, fa esment d'alguna idea per explicar el ferromagnetisme, si bé no desenvolupa aquest punt.

Ens ocuparem aquí bàsicament d'analitzar l'article publicat el maig de 1905 en el qual exposa el seu model teòric sobre el magnetisme. Langevin comença considerant el càlcul del camp magnètic creat per una càrrega en moviment sobre la base de l'electromagnetisme clàssic. El resultat que n'obté li permet d'establir la conclusió que una càrrega en moviment al llarg d'una òrbita tancada origina un camp magnètic que és equivalent, per a distàncies grans comparades amb la mida de l'òrbita, al creat per un imant que ell anomena "elemental". Per tal de fer-nos-en una bona imatge mental el podem considerar com si fos una barra cilíndrica, perpendicular al pla de l'òrbita (Langevin, 1905a: 77). Aquestes càrregues en moviment formen allò que Langevin anomena "corrents d'Ampère" (Langevin, 1905a: 124).

Langevin considera que hi ha electrons positius i negatius (Langevin, 1905a: 79). Els negatius serien els "corpúscles catòdics" recentment descoberts. Pel que fa als positius, Langevin no n'especifica clarament la natura ni les propietats. N'accepta però, l'existència, ja que la molècula ha de ser elèctricament neutra i esmenta el fet que la raó e/m és unes 1000 vegades més gran per als electrons negatius que no pas per als positius.

Langevin, doncs, assumeix la idea que Ampère havia llançat durant el primer quart del segle XIX i dona com a causa els electrons, positius i negatius, en moviment. Cada electró en moviment origina un imant elemental de manera que el moment magnètic de la molècula serà la suma vectorial de tots aquests moments particulars. La suma podrà ser nul·la o no segons el grau de simetria que tingui la molècula. Així doncs, introdueix en una primera fase, una diferenciació entre materials "para" i "diamagnètics" segons que les seves molècules tinguin o no moment magnètic resultant.

Ara bé, les càrregues elèctriques en moviment, que segueixen òrbites tancades, presenten problemes d'estabilitat. La literatura de l'època distingeix sovint entre dos tipus d'estabilitat: mecànica i radiativa (Heilbron; Kuhn, 1969: 241-282 o Heilbron, 1977). La primera fa referència al fet que entre les càrregues mòbils existeixen forces d'interacció elèctriques les quals, segons la geometria de la molècula, podrien provocar la seva ruptura. La segona fa referència al fet ineludible que tota càrrega accelerada, d'acord amb l'electromagnetisme clàssic, ha d'emetre radiació. Langevin en considerar les seves òrbites, "els corrents d'Ampère", només s'ocupa de l'estabilitat de radiació; hom dona per fet que l'estabilitat mecànica és garantida per les pròpies forces internes existents entre els electrons que fan de "l'edifici molecular" un sistema mecànicament estable.

Hom pot traslladar fàcilment aquesta idea al fenomen del magnetisme que té el seu origen, precisament, en els "corrents d'Ampère". De fet, encara que Langevin no ho manifesti concretament, suposa que les forces internes mantenen la configuració de la molècula (Langevin, 1905a: 81). Ja que l'experiència demostra que els "raigs catòdics" són constituents de la matèria, l'estabilitat mecànica ha de ser una realitat, altrament no s'entendria l'estabilitat dels sistemes moleculars.

Per a Langevin, la radiació emesa per una molècula és, des d'un punt de vista quantitatiu, molt poc important. L'energia que es dissipa per mitjà de la radiació és

negligible. Thomson (1903: 681) havia exposat una idea similar en en seu article de 1903. Hi afirmava a partir del càlcul que:

"the rate at which energy radiates diminishes very rapidly as the number of particles increases [...]".

Les càrregues accelerades emeten energia en forma d'ones entre les quals s'estableixen fenòmens d'interferència. És aquest fet que possibilita que la taxa d'energia radiada disminueixi a mesura que augmenta el nombre de partícules involucrades en el procés.

Langevin resol la qüestió de la radiació emesa per la molècula en termes de fenòmens col·lectius. Com que la molècula té moltes càrregues, la radiació emesa serà poc important, però cal admetre'n la presència, i per mantenir l'òrbita, Langevin recorre a la idea d'*equilibri tèrmic*. Presumiblement l'òrbita es manté estable gràcies a l'equilibri tèrmic que s'estableix entre el medi i l'òrbita (Langevin 1905a: 101). Així, podem afirmar que Langevin assegura l'estabilitat del sistema sense introduir idees o lleis alienes a la física clàssica.

Un altre tret important del model de Langevin, és que els moments magnètics associats a les molècules, o als corrents elementals, són permanents en el sentit que el mòdul del moment magnètic no depèn del moviment de la molècula (Langevin, 1905a: 112):

"(...) le moment magnétique d'une molécule, [est] sensiblement invariable quand celle-ci se déplace [...]"

Langevin emprà els mots "sensiblement invariable", amb la qual cosa indica que la invariança del moment és aproximada, és a dir, que en totes les condicions assolibles en el laboratori, la variació del moment magnètic és menyspreable i entra plenament dins del marge d'error experimental.

J. H. Van Vleck (1899-1980), durant la cerimònia de lliurament del premi Nobel que guanyà l'any 1977 pel seu treball en el camp del magnetisme, afirma (Lundquist, 1992: 354):

"When Langevin assumed that the magnetic moment of the atom or molecule had a fixed value μ , he was quantizing the system without realizing it [...]"

Nosaltres, però, no estem d'acord amb aquesta afirmació: el moment magnètic de Langevin és permanent, però en cap cas és quàntic. Com hem argumentat abans Langevin, en el seu model, admet les aproximacions com a recurs. Aquest fet, però, no significa que el model plantejat per Langevin no sigui estrictament clàssic.

Un cop introduïdes les hipòtesis generals del model, Langevin seguidament examina l'efecte que tindrà damunt els "circuitos d'Ampère" la introducció d'un camp magnètic extern. A l'hora d'estudiar els efectes, Langevin en considera dos: el diamagnetisme i el paramagnetisme, que poden aparèixer de manera conjunta, encara que tenen orígens diferents (Langevin, 1905a: 71):

"courants particuliers d'Ampère, susceptibles de s'orienter sous l'action d'un champ extérieur pour donner lieu au magnétisme induit [paramagnétisme], ou de réagir par induction, selon l'idée de Weber, contre la création de ce champ extérieur comme le font les corps diamagnétiques."

El paramagnétisme tindrà així el seu origen en l'orientació dels "corrents elementals", mentre que l'origen del diamagnétisme serà fenòmens d'inducció sobre aquests corrents.

El tema següent és el fenomen del diamagnétisme. Els electrons circulen al llarg d'òrbites tancades i l'acció d'un camp magnètic extern provoca, d'acord amb les equacions de l'electromagnétisme clàssic, l'aparició d'una f.e.m. induïda seguint la "Llei de Lenz", segons la qual hi ha una variació de la velocitat dels electrons que no modifica la forma dels circuits. Langevin considera la molècula com un medi continu, li aplica les equacions de Maxwell i n'obté una altra per la susceptibilitat del sistema de signe negatiu i independent de la temperatura, d'acord amb els resultats obtinguts per Curie (Curie, 1895: 203-207). El tractament de medi continu es basa en la creença de l'època, que la molècula estava formada per un gran nombre d'electrons, els quals, en la idea de Langevin, poden ser positius o negatius. Ara bé, davant els resultats obtinguts, Langevin afirma que (Langevin, 1905a: 89):

"ce sont les premiers [les électrons négatifs], présents dans toute matière, qui joueront le rôle essentiel dans la production du diamagnétisme."

Atesa la causa que l'origina, el diamagnétisme serà una propietat general de la matèria i també, com ja era previsible, independent de la temperatura. És important remarcar que si hom analitza, tal com fa Langevin (Langevin, 1905a: 96), fins i tot pels camps més intensos que es poden obtenir en el laboratori, el valor de la correcció diamagnètica introduïda sobre el mòdul del moment magnètic aquella és molt petita, amb la qual cosa aquest es pot considerar pràcticament constant, d'acord amb la idea de "permanència" comentada anteriorment.

Si la molècula, per arguments de simetria, té un moment magnètic nul, presentarà diamagnétisme. Solament té un moment no nul, al diamagnétisme que apareix cal afegir un nou efecte: el paramagnétisme. Si negligim, tal com fa Langevin, la petita variació diamagnètica del mòdul del moment de la molècula, el camp extern actuarà damunt seu orientant el vector moment en la direcció del camp. A aquest efecte d'ordenació s'hi oposa la temperatura, la qual tendeix a desordenar el sistema. En fer el desenvolupament teòric, Langevin empra l'*Estatística de Maxwell-Boltzmann* i torna a aplicar la hipòtesi que el mòdul del moment magnètic de la molècula és permanent, si bé pot adoptar qualsevol orientació en l'espai. D'aquesta manera aconsegueix donar una expressió matemàtica a la "Llei de Curie". Aquest és, possiblement, el gran èxit del model de Langevin.

Quan Langevin aplica el seu model sobre el paramagnétisme a la molècula d'oxigen arriba a la conclusió que solament els electrons perifèrics, els responsables de les propietats químiques, contribueixen al paramagnétisme. Hi ha qui ha afirmat que la idea va influir

Bohr a l'hora de desenvolupar la seva teoria³. No obstant això, no és la nostra intenció ocupar-nos aquí d'aquesta possibilitat.

Conclusions

Per acabar resumirem els trets essencials de la nostra anàlisi del model proposat per Langevin. En primer lloc cal insistir en que si els resultats obtinguts a partir del model, són considerats com aproximacions, i això és el que fa Langevin, el model és estrictament clàssic. Ara bé, si els pensem per un moment com a exactes, és evident que la física clàssica és insuficient per donar resposta als interrogants que apareixerien, amb la qual cosa és necessari aplicar idees alienes a la física clàssica. Aquest no és el cas, però, ni pel que fa a la forma ni pel que fa al contingut, de la proposta de Langevin.

Per altra banda, l'estabilitat implícita en el model és assegurada a partir de l'existència de l'equilibri tèrmic. Atès que l'estabilitat està lligada a un fenomen col·lectiu no ens sembla necessari recórrer a cap model atòmic com imatge d'un àtom aïllat.

Langevin, en cap moment, no fa referència expressa en el seu treball de 1905 a idees alienes a la física clàssica, ni tampoc a cap model atòmic concret.

Hom fa constar que part de les investigacions incloses en aquest treball han estat subvencionades per la CICYT (PB 93-1239).

Bibliografia

- BENSAUDE-VINCENT, B. (1987), *Langevin, Science et Vigilance*, Col·lecció: Un Savant, une Époque, París, Belin.
- BOATO, G.; MORO, N. (1994), "Bancalari's Role in Faraday's Discovery of Diamagnetism and the Successive Progress in the Understanding of Magnetic Properties of Matter", *Annals of Science*, 51, 391-412.
- CURIE, P. (1895), "Propriétés magnétiques des corps à diverses températures", *Journal de Physique*, 4 (3a sèrie), 197-212 i 263-272.
- HEILBRON, J.L.; KUHN, T.S. (1969), "The Genesis of the Bohr Atom", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, 211-290.
- HEILBRON, J.L. (Abril 1977), "J. J. Thomson and the Bohr Atom", *Physics Today*, 30, 23-30.
- LANGEVIN, P. (1904), "Sur la Théorie du Magnétisme", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 139, 1204-1207.
- LANGEVIN, P. (1905a), "Magnétisme et théorie des électrons", *Annales de Chimie et de Physique*, 5, 70-127.

³ Vegeu per exemple, Bensaude-Vincent (1987), 30. Aquesta obra constitueix una acurada biografia de P. Langevin.

- LANGEVIN, P. (1905b), "Sur la Théorie du Magnétisme", *Journal de Physique*, 4 (4a série), 679-693.
- LEEUWEN, J.H. (1921), "Problèmes de la théorie électronique du magnétisme", *Journal de Physique et le Radium*, 2, 361-377.
- LUNDQUIST, S. (ed.) (1992), *Nobel Lectures in Physics 1971-1980*, Singapur, World Scientific.
- NAVARRO, L. (1990), *Einstein, profeta y hereje*, Barcelona, Tusquets Editors.
- PIERCE WILLIAMS, L. (1962), "Ampère electrodynamic molecular model", *Contemporary Physics*, 4, 113-123.
- SOLOVINE, M. (ed.) (1921), *Mémoires sur l'électromagnétisme et l'électrodynamique*, Col·lecció: Les Maîtres de la Pensée Scientifique, Paris, Gauthier Villars.
- THOMSON, J.J. (1903), "The Magnetic Properties of Systems of Corpuscles Describing Circular Orbits", *Philosophical Magazine*, 5, 673-693.
- WEISS, P. (1907), "L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique", *Journal de Physique*, 6 (4a. série), 661-690.
- WHITTAKER, E. (1987), *A History of the Theories of Aether and Electricity*, 2 vol., Col·lecció: The History of Modern Physics 1800-1950, Londres, Tomash Publishers, vol. 2.