

WILLIAM THOMSON I LA TEORIA ELECTROMAGNETICA DE LA LLUM DE MAXWELL: FONTS D'INSPIRACIO I ACTITUDS DE REFUS*

JOAQUIM PLA BRUNET

Universitat de Vic

Centre d'Estudis d'Història de les Ciències, UAB

RESUMEN

En este artículo se presenta la influencia de William Thomson (lord Kelvin, 1824-1907) -Kelvin es el nombre de un río de Escocia, que rodea la Universidad de Glasgow- en la parte de la obra de James Clerk Maxwell (1831-1879) tocante al electromagnetismo. Y a la vez se insinúa el enigma de las actitudes de rechazo de Thomson a puntos de la teoría de Maxwell que el mismo había inspirado. La parte más radicalmente innovadora de la obra de Maxwell es la introducción del concepto de corriente de desplazamiento, con la consiguiente teoría electromagnética de la luz y la posibilidad de producir ondas electromagnéticas.

ABSTRACT

This paper centres on the influence of William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) -the name Kelvin is taken from the Kelvin River, which skirts the University of Glasgow, in Scotland- on the work of James Clerk Maxwell (1831-1879) concerning electromagnetism. It also hints at the issue of Thomson's attitude of rejection of some parts of Maxwell's theory which he himself had inspired. The most innovating part of Maxwell's work is the introduction of the displacement current concept with the consequent electromagnetic theory of light and the possibility of generating electromagnetic waves.

* Aquest article és una versió resumida d'un treball de recerca per al Mestratge en Història de les Ciències, dirigit pel Dr. Manuel G. Doncel, i defensat el 29 de setembre de 1995 a la Sala de Graus de la Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona. L'autor dóna les gràcies al Dr. Antoni Malet per les indicacions que li va fer quan va començar a definir el tema de recerca, al Dr. Xavier Roqué pel suport inestimable que sempre li ha donat, i fa públic reconeixement al Dr. Bruce J. Hunt, de la Universitat de Texas, pels comentaris sobre els maxwellians.

Thomson nunca aceptó el concepto de corriente de desplazamiento ni la teoría electromagnética de la luz. El rechazo de Thomson fue a posteriori, cuando Maxwell ya había muerto. La relevancia científica de Thomson justifica que se analicen las objeciones que presentó a la teoría de la luz de Maxwell.

Thomson never came to accept either the displacement current concept or the electromagnetic theory of light. Thomson's rejection was a posteriori, when Maxwell was already died. The scientific importance of Thomson justifies the analysis of his objections to Maxwell's theory of light.

Paraules clau: Siglo XIX, Electricidad, Magnetismo, Luz, Eter, Thomson, Maxwell.

1. Introducció

Els pilars de la creació de la teoria del camp electromagnètic són: Michael Faraday (1791-1867), William Thomson (1824-1907) i James Clerk Maxwell (1831-1879). Faraday representa el gèrmen, Thomson el conreu i Maxwell la fructificació. Els treballs experimentals sobre ones electromagnètiques que Heinrich Hertz (1857-1894) va fer entre 1887 i 1888 van ser decisius per a confirmar la teoria de Maxwell i donar plena validesa a la idea de camp¹.

L'objectiu d'aquest article és de posar de manifest la influència de Thomson en una part de l'obra de Maxwell, aquella que pertoca a l'electromagnetisme, i de discutir l'enigma de les posteriors actituds de refús de Thomson a punts de la teoria de Maxwell que ell mateix havia inspirat.

La correspondència entre Thomson i Maxwell que es conserva posa de manifest com Thomson va introduir Maxwell a l'estudi del magnetisme, i ens permet de veure el lligam humà i científic que es va establir entre ells dos. Thomson ben sovint va fer d'oracle de Maxwell, i la seva relació és plena de varietat de facetes on es barregen el mestratge, l'amistat i l'admiració. Una relació que va continuar i que es va enfortir al llarg de tota la vida de Maxwell².

Una part de la influència directa de Thomson en Maxwell es pot veure en el paper inspirador que el model de vòrtexs moleculars que Thomson va presentar, el 1856, en *Dynamical Illustrations of the Magnetic and the Helicoidal Rotatory Effects of Transparent Bodies on Polarized Light* (*Dynamical Illustrations*) va tenir en l'article on Maxwell va introduir el concepte de corrent de desplaçament i la primera versió de la teoria

electromagnètica de la llum, l'*On Physical Lines of Force (Physical Lines)*, publicat entre 1861 i 1862.

Amb el model de vòrtexs moleculars, Thomson va creure que podia presentar una explicació de l'estructura interna del camp electromagnètic que tingués fonamentació mecànica. Les forces magnètiques es podrien explicar com el resultat d'interaccions dinàmiques dels moviments dels vòrtexs moleculars d'un èter electromagnètic.

A *Physical Lines*, Maxwell va recollir els vòrtexs moleculars de Thomson amb la intenció de construir un model mecànic complet i consistent dels fenòmens electromagnètics, basat en el concepte de camp. En aquest article, Maxwell va ampliar la llei d'Ampère i va donar la primera versió d'una teoria electromecànica de la llum, tot relacionant la velocitat de propagació de les vibracions transversals en un medi elàstic, l'èter, amb el mòdul de rigidesa i amb la densitat del medi. L'ampliació de la llei d'Ampère consisteix a afegir un terme nou a la primitiva llei: el corrent de desplaçament. El corrent de desplaçament és l'origen de la teoria electromagnètica de la llum i de la possibilitat de generar ones electromagnètiques. Sense desplaçament elèctric no hi ha ones electromagnètiques³.

Poc temps després, el 1865, Maxwell va publicar *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, on va reformular la primitiva versió electromecànica de la llum per presentar-ne la teoria electromagnètica. La reformulació va consistir a deduir les equacions del camp electromagnètic i a identificar la llum com una ona electromagnètica a partir de la mecànica analítica de Lagrange. Com que el formulisme de la dinàmica de Lagrange no requereix de fer cap hipòtesi respecte d'un model mecànic específic en l'estructura interna del sistema que es vol estudiar, la reformulació de Maxwell, deslligada de tota representació concreta de la constitució microscòpica de l'èter, és l'autèntica teoria electromagnètica de la llum⁴.

Que l'essència de la reformulació de Maxwell sigui de prescindir de tota referència a l'estructura interna de l'èter, no s'ha d'interpretar ni com un abandonament de la creença en l'existència de l'èter ni com una alternativa a la concepció mecanicista de la naturalesa. La teoria de Maxwell era una conseqüència del concepte de corrent de desplaçament, i aquest concepte es relacionava directament amb la propietat elàstica de l'èter, l'existència del qual ni tan sols no era posada en dubte.

La culminació del treball de Maxwell sobre la teoria del camp electromagnètic és exposada en el llibre *A Treatise on Electricity and Magnetism (Treatise)*, publicat el 1873, amb plena fonamentació mecànica.

Posteriorment, quan Maxwell ja era mort, Thomson va manifestar actituds de refús a punts de la teoria electromagnètica de Maxwell. En concret, Thomson no va poder concebre mai la idea de corrent de desplaçament. L'equació del corrent total, que representa la llei d'Ampère ampliada, i que ara identifiquem com una de les quatre equacions de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

va ser la bèstia negra de Thomson. D'altra banda, aquesta equació és el cor de la teoria electromagnètica de la llum i de la possibilitat de generar ones electromagnètiques.

El caràcter de protagonista que Thomson va tenir en la construcció de dues branques principals de la física del segle XIX, la termodinàmica i l'electromagnetisme, fa que la seva actitud de refús a punts de la teoria de Maxwell sigui mereixedora de consideració i d'anàlisi.

L'actitud de Thomson és enigmàtica, complexa i plena de contradiccions. Per les cartes de Maxwell a Thomson, sabem que Thomson va col·laborar amb Maxwell en la redacció del *Treatise*, i tot fa pensar que Thomson va tenir el llibre a mà des del primer moment⁵.

Sabent aixó, ens podem preguntar:

Per què Thomson va esperar fins a 11 anys després de publicar-se el *Treatise* i a cinc després de morir Maxwell per oposar-se a la teoria electromagnètica de la llum?

Quins raonaments van portar Thomson a rebutjar la teoria de Maxwell?

Quins són els arguments físics i matemàtics de Thomson que justifiquin l'actitud de refús?

Amb quina fonamentació teòrica i experimental va fer servir els arguments de rebuig?

Per què la demostració experimental que va fer Hertz de l'existència d'ones electromagnètiques no va ser decisiva per convèncer Thomson?

Tot i que són preguntes que de moment no tenen una resposta concloent, en aquest article exposaré el context històric en què Thomson es va manifestar

en contra de Maxwell, i donaré arguments que ajudin a entendre l'actitud de refús de Thomson⁶.

2. Ascendent de Thomson en la formació de Maxwell

La coneixença entre Thomson i Maxwell va començar a les vintenes jornades de la *British Association for the Advancement of Science* celebrades a Edimburg el juliol i l'agost de 1850, en les quals Thomson havia presentat *On the Theory of Magnetic Induction in Crystalline Substances*⁷. En aquesta època Maxwell tenia 19 anys, acabava l'etapa d'estudiant a Edimburg i es preparava per anar a Cambridge. Thomson era catedràtic a Glasgow des de 1846 i tenia 26 anys. La primera referència que Thomson fa de Maxwell es troba en unes notes del seu diari amb data de 14 d'agost de 1850:

"I have just finished a letter (of 18 pp. note paper) to Tyndall (whom I met at the British Assoc[iation] meeting at Edinb[urgh] last Thursday and Friday week [...]); and that this occurred to me in consequence of having had my attention directed to young Clerk Maxwell's (now of Peterhouse) optical experiments on isinglass dried under constraint, which analogy would lead us to suppose should have magnecrystallic properties; that I have asked C[lark] M[axwell] to make some preparations;" [THOMPSON, 1910, p. 222].

Una carta de Maxwell del 16 de setembre de 1850 dirigida al seu amic Lewis Campbell ens fa veure com Thomson va introduir Maxwell a l'estudi del magnetisme i ens permet d'establir un lligam coherent amb les notes del diari de Thomson:

"Professor W. Thomson has asked me to make him some magne-crystallic preparations which I am now busy with. [...] Not that I am turned chemist. By no means; but common cock. My fingers are abominable with glue and chalk, gum and flour, wax and rosin, pitch and tallow, black oxide of iron, red ditto and vinegar. By combining these ingredients, I strive to please Prof. Thomson, who intends to submit them to Tyndall and Knoblauch, who, by means of them, are to discover the secrets of nature, and the origin of the magne-crystallic forces" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 33, p. 205].

Per un manuscrit de Maxwell sobre la funció potencial, que malgrat que no està datat Harman situa en els primers anys de la dècada de 1850, concretament *circa* 1851, tenim indicis que ja llavors Maxwell estava al corrent dels treballs de Thomson sobre electricitat i magnetisme. Així ho suggereix el títol i alguns paràgrafs del manuscrit de Maxwell, quan es comparen amb l'article de Thomson *A Mathematical Theory of Magnetism*, presentat el juny de 1849 i publicat el 1851⁸.

Que la relació entre Thomson i Maxwell seria cada vegada més estreta ho fa evident un fragment d'una carta de Maxwell al seu amic Campbell, del 5 de juny de 1852 des del Trinity College de Cambridge. En aquesta carta Maxwell explicava que *Thomson as I think I told you is at Peterhouse. I bathe with him in the morning when there is not ex[aminatio]n* [MAXWELL, *Letters I*, núm. 37, p. 212]. Segons explica Silvanus P. Thompson (el primer biògraf de Thomson), en l'etapa d'estudiant a Cambridge, al St Peter's College (Peterhouse), Thomson tenia per costum de fer una capbussada al riu Cam, estiu i hivern⁹.

Quan l'any 1845 Thomson va ser nomenat *Foundation Fellow of Peterhouse*, va adquirir el dret de disposar d'habitació en el College, dret que va conservar fins al setembre de 1852¹⁰. Thomson aprofitava aquesta avinentesa per passar uns setmanes d'estiu a Cambridge *to make acquaintance with the younger men -Steele, Maxwell, and Tait amongst them- who were working at mathematical physics* [THOMPSON, 1910, p. 199]. Maxwell va començar els anys d'estudi a Cambridge a Peterhouse i posteriorment es va traslladar al *Trinity*. A l'hora de triar el *college* a Cambridge, el pare de Maxwell va demanar el parer de Thomson, entre d'altres¹¹.

Alguns fragments de cartes són un exemple clar del paper de mestratge de Thomson respecte de Maxwell en l'estudi de l'electricitat i el magnetisme. La que es considera que és la primera carta de Maxwell a Thomson té data de 20 de febrer de 1854, i correspon al final del període d'estudiant de Maxwell al *Trinity*.

"Dear Thomson

Now that I have entered the unholy estate of bachelorhood I have begun to think of reading. This is very pleasant for some time among books of acknowledged merit wh[ich] one has not read but ought to. But we have a strong tendency to return to Physical Subjects and several of us here wish to attack Electricity.

Suppose a man to have a popular knowledge of electrical show experiments and a little antipathy to Murphys Electricity¹², how ought he to proceed in reading & working so as to get a little insight into the subject wh[ich] may be of use in further reading?

If he wished to read Ampère, Faraday &c how should they be arranged, and at what stage & in what order might he read your articles in the Cambridge Journal?

If you have in your mind any answer to the above questions, three of us here would be content to look upon an embodiment of it in writing as advice" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 45, p. 237].

La resposta de Thomson no es coneix, però en una llarga carta del 13 de novembre de 1854, Maxwell exposa amb detall a Thomson els progressos que ha fet en l'estudi de l'electricitat i li agraeix les indicacions rebudes.

"As I wish to study the growth of ideas as well as the calculation of forces, and as I suspect from various statements of yours that you must have acquired your views by means of certain conceptions which I have found great help, I will set down for you the confessions of an electrical freshman.

I got up the fundamental principles of electricity of tension easily enough. I was greatly aided by the analogy of the conduction of heat, wh[ic]h I believe is your invention at least I never found it elsewhere [...] Now I have heard you speak of *magnetic lines of force* & Faraday seems to make great use of them, but others seem to prefer the notion of attractions of elements of currents directly" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 51, pp. 254-255].

Thomson va concebre una metodologia d'explicació científica que considerava fortament la utilització d'analogies o d'equivalències entre temes inconnexos, com és el cas de l'analogia thomsoniana entre la conducció de la calor i l'electrostàtica. El 1842, quan tenia 18 anys, Thomson va publicar *On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies, and its Connection with the Mathematical Theory of Electricity*, on va presentar una equivalència formal o analogia matemàtica entre la teoria de la calor de Fourier i les lleis de les atraccions electrostàtiques.

La metodologia thomsoniana basada en les analogies va influir fortament Maxwell, tot i que la concepció epistemològica de l'ús de les analogies és diferent en Thomson i en Maxwell¹³. Maxwell manifesta amb un fi sentit de l'humor l'admiració per l'analogia thomsoniana en una carta a Thomson amb data de 15 de maig de 1855, on l'èmfasi l'he posat jo.

"I am trying to construct two theories, mathematically identical, in one of which the elementary conceptions shall be about fluid particles attracting at a distance while in the other nothing (mathematical) is considered but various states of polarization tension &c existing at various parts of space. The result will resemble your analogy of the steady motion of heat. *Have you patented that notion with all its application? for I intend to borrow it for a season, [...]*" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 66, pp. 306-307].

El 13 de setembre de 1855 Maxwell escriu una carta a Thomson on fa un resum de les lectures que ha fet sobre electromagnetisme, i exposa uns projectes que es concretaran en l'article de Maxwell *On Faraday's Lines of Force*, publicat el 1856.

"I have got a good deal out of you on electrical subjects, both directly & through the printer & publisher & I have also used other helps, and read Faraday's three volumes of researches [*Experimental Researches in Electricity*]. [...] Now I have been planning and partly executing a system of propositions about lines of force & c which may be *afterwards* applied to Electricity, Heat or Magnetism or Galvanism, [...]" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 71, pp. 319-320].

A la introducció qualifico Faraday, Thomson i Maxwell de pilars creadors de la teoria del camp electromagnètic i caracteritzo Thomson com el conreu. Per demostrar que aquest qualificatiu -que hom podria titllar d'agosarat- no és gratuït, i per posar clarament de manifest la influència de Thomson en Maxwell, afegeixo un significatiu paràgraf de la mateixa carta del 13 de setembre de 1855.

"[...] I would be much assisted by your telling me whether you have not the whole draught of the thing lying in loose papers and neglected only till you have worked out Heat or got a little spare time.

The reasons I have for thinking so are -That you are acquainted with Faradays theory of lines of force & with Ampère laws of currents and of course you must have wished at least to understand Ampère in Faradays sense [...] As there can be no doubt that you have the mathematical part of the theory in your desk all that you have to do is to explain your results with reference to electricity. I think that if you were to do so publicly it would introduce a new set of electrical notions into circulation & save much useless speculation" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 71, pp. 322-323].

En aquesta carta Maxwell fa referència als treballs de Thomson sobre electricitat i magnetisme publicats en *On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Forces (Mechanical Representation)*, el 1847, i en *A Mathematical Theory of Magnetism*, el 1851. Thomson entenia la *Mechanical Representation* com the '*mechanico-cinematical*' (!) *representation of electric, magnetic, and galvanic f[or]ces* [THOMPSON, 1910, p. 197]. Es a dir, no entrava en l'estructura interna o en el que en podríem dir la dinàmica. La part dinàmica seria l'objectiu de l'article de 1856, les *Dynamical Illustrations*. El títol de l'article de 1851 és prou suggerent per saber què pretenia.

Per tancar aquest punt de testimoniatge de l'ascendència de Thomson en Maxwell, i a tall d'anècdota, es pot afegir que Maxwell, en una carta del 19 de febrer de 1856, deia a Thomson: *I wish you to write out a description of me and sign it that I may send it to representatives of the Crown and that they may look favourably on my scheme of setting up as a professor of nat[ural] phil[osophy] at Marischal College Aberdeen* [MAXWELL, *Letters I*, núm. 94, p. 396]; i que el 30 de novembre de 1859 Maxwell demanava a Faraday: *If*

you should be able, from your knowledge of the attention which I have paid to science, to recommend me to the notice of the Curators [MAXWELL, *Letters I*, núm. 166, p. 627]. La petició de Maxwell a Faraday era per accedir a la càtedra de *Natural Philosophy* a la universitat d'Edimburg. Aquest parell d'anècdotes ensenyen que la tradició de buscar recomanacions per aconseguir un càrrec ve de lluny, i que Maxwell sabia triar bons padrins.

3. L'efecte Faraday com a pedra de toc

Tres fets concrets són clau en la gènesi de l'electricitat i del magnetisme al segle XIX: la pila de Volta, el 1800; l'experiment d'Oersted, el 1820; i la inducció electromagnètica de Faraday, el 1831.

Fins al 1800, les úniques fonts d'electricitat que hi havia eren les màquines d'electricitat estàtica per fricció i les ampolles de Leiden. Aquestes fonts només produïen electricitat durant breus instants, mentre durava la descàrrega dels aparells. No es coneixia cap giny capaç de subministrar electricitat de forma permanent. De fet, aleshores ni tan sols no tenia sentit el concepte de corrent elèctric; només es podia parlar d'electricitat estàtica. La pila d'Alessandro Volta (1745-1827) va ser la primera font d'energia elèctrica permanent. Això va desencadenar tot un seguit de nous experiments.

Les observacions de Hans Christian Oersted (1777-1851), publicades el 1820, van posar de manifest per primera vegada que l'electricitat té efectes magnètics. Això va donar origen a un concepte nou: el d'electromagnetisme.

L'any 1831, els treballs experimentals van portar Faraday a descobrir que el magnetisme té efectes elèctrics, del magnetisme es pot obtenir electricitat: és el fenomen d'inducció electromagnètica.

El fort convenciment en la unitat de les forces de la naturalesa va ser un element decisiu en l'afany de Faraday per trobar algun efecte de l'electricitat o del magnetisme sobre la llum, per primera vegada el 10 de setembre de 1822 i de nou l'any 1833, encara que amb resultat negatiu¹⁴. Un suggeriment de Thomson va fer que Faraday tornés a buscar l'efecte. El 13 de setembre de 1845, Faraday va observar que quan un raig de llum linealment polaritzat travessa una peça de vidre d'índex de refracció alt -*un heavy glass*- en presència d'un camp magnètic, de manera que el raig de llum sigui paral·lel a la direcció del camp magnètic, el pla de polarització del raig de llum experimenta una rotació¹⁵. Aquest fenomen ara es coneix per efecte Faraday, i el suggeriment es toba en una carta de Thomson a Faraday de 6 d'agost de 1845, on Thomson explicava el bon resultat que havia obtingut en l'intent de matematitzar el

concepte de línies de força¹⁶. Val la pena de ressaltar que quan Thomson va fer el suggeriment a Faraday, aquest tenia 53 anys, però Thomson tot just n'havia fet 21.

L'efecte Faraday és una interacció magnetoòptica que era desconeguda fins llavors i va establir un lligam totalment nou entre llum, èter, magnetisme i matèria.

El propòsit més ambiciós que hi havia en la mentalitat de l'època era de concebre un model mecànic explicatiu de les interaccions entre electricitat, magnetisme, llum, matèria i èter. De manera que amb l'ajut del model fos possible de deduir les equacions que s'havien obtingut a partir de bases fenomenològiques. Tant els físics *electrodinàmics* (els partidaris de l'acció a distància) com els *campistes* (els defensors del concepte de camp) maldaven per construir teories mecàniques.

La descoberta que un camp magnètic fa girar el pla de polarització d'un raig de llum va reforçar el convenciment de Faraday que una línia de força magnètica era un estat físic real, que era alguna cosa més que una bona representació geomètrica: es tractava d'una condició física de l'espai entorn d'un imant. A més a més, el nou fenomen indicava una possible resposta sobre quina era la naturalesa de la condició física, perquè en la rotació del pla de polarització hi havia d'haver una rotació de l'èter entorn de les línies de força magnètica.

Per tant, l'efecte Faraday era una bona pedra de toc per a les diferents teories sobre l'electricitat i el magnetisme proposades a la dècada dels cinquanta i en els primers anys de la dècada dels seixanta, perquè les expressions que les dues teories, l'electrodinàmica i la basada en el concepte de camp, donaven de l'angle de rotació del pla de polarització de la llum eren bastant diferents.

Per als defensors del camp, els britànics Thomson i Maxwell bàsicament, el fet que l'efecte del magnetisme sobre la llum només s'observés en medis materials sòlids i líquids però no ni en el buit ni en gasos -en gasos no es va observar fins al 1880-, reclamava una explicació teòrica. El nou fenomen era un repte per a intentar de trobar una representació mecànica definitiva del camp magnètic: la constitució interna o molecular en el nivell més íntim, per poder explicar la interacció llum/matèria. Aquest aspecte és d'especial importància, si es té present que fins aquell moment no s'havia estudiat cap fenomen per al qual les dues teories no fessin pràcticament les mateixes prediccions¹⁷.

Hi ha dos períodes ben diferenciats en el treball de Thomson en electromagnetisme. Un d'ells va des del primerenc article de 1842 sobre

electrostàtica fins a l'any 1856. El segon període va des del 1870 fins al final de la seva vida. L'efecte Faraday va ser decisiu per a decantar l'atenció de Thomson de l'electricitat cap al magnetisme, per acostar-lo a la idea d'una acció entre partícules contigües i per esperonar-lo a pensar una representació mecànica del camp magnètic. Tres dels quatre articles més importants del primer període del treball de Thomson en electromagnetisme van ser inspirats per l'efecte Faraday: *Mechanical Representation* (1847), *A Mathematical Theory of Magnetism* (1851) i *Dynamical Illustrations* (1856).

4. La idea de vòrtexs moleculars de Thomson

Com he dit a la introducció, Thomson va presentar el seu primer model de vòrtexs moleculars a *Dynamical Illustrations*. La idea de vòrtexs moleculars, la va recollir de l'enginyer i físic escocès William John Macquorn Rankine (1820-1872), el qual, el 1850, va presentar un article titulat *On the Mechanical Action of Heat, Especially in Gases and Vapours*, on va introduir la hipòtesi de vòrtexs moleculars per construir una teoria dinàmica de la calor.

Segons Rankine, un vòrtex molecular era un moviment en remolí entorn de cada centre molecular del medi material que impregnava l'espai entre molècules. La naturalesa del medi material, l'èter, era una de les qüestions problemàtiques que es plantejaven: es podria tractar d'un fluid continu o bé d'un fluid molecular.

Com que Thomson creia fermament que l'explicació última dels fenòmens electromagnètics s'havia de trobar en l'estructura de l'èter, concebuda de forma dinàmica, esbrinar-ne la constitució microscòpica era la porta d'entrada a una teoria dinàmica completa: els vòrtexs moleculars havien de ser la clau. Amb la intenció d'oferir una tal teoria, va publicar el *Dynamical Illustrations*. Aquest article té dues parts ben diferenciades. La primera part és una argumentació qualitativa i és la fonamental; la segona conté uns exemples per il·lustrar les argumentacions: són les *dynamical illustrations*.

A les substàncies que tenien la propietat de fer girar el pla de polarització de la llum quan la llum les travessava, se'ls deia que tenien una propietat helicoidal. Aquesta propietat podia ser natural, com en el cas de dissolucions de sucres o de tartrats, en l'essència de trementina o en cristalls de quars, o induïda, com era el cas d'un *heavy glass* situat en un camp magnètic: l'efecte Faraday.

Thomson argumentava que, com que la reacció elàstica d'un sòlid sotmès a una deformació homogènia no presentava asimetria helicoidal ni asimetria

dipolar, la rotació del pla de polarització de la llum per un cos havia de ser deguda a reaccions elàstiques dependents de les heterogeneïtats en la deformació entre distàncies comparables amb la longitud d'ona de la llum, o bé a *some heterogeneity of the luminous motions dependent on a heterogeneity of parts of the matter of lineal dimensions not infinitely small in comparison with the wave length* [THOMSON, 1856, p. 150].

Thomson pensava que la rotació del pla de polarització de la llum que s'observava en les substàncies amb activitat òptica (la rotació natural) es podia explicar considerant que aquestes substàncies estaven formades de fibres diminutes en forma d'hèlix que *tenien mà* ben definida: eren dextrogires (*right-handed*) o bé levogires (*left-handed*). La mà d'una hèlix, dextrogira o bé levogira, és definida pel sentit d'enrotllament que avança i gira.

En la rotació natural, el sentit de desviació del pla de polarització era determinat pel sentit de propagació del raig de llum: una substància dextrogira sempre feia girar el pla de polarització de la llum cap a la dreta (respecte del sentit de propagació del raig); una substància levogira sempre el feia girar cap a l'esquerra. D'aquesta propietat, se'n diu *tenir mà*.

De l'efecte Faraday, el distintiu que més va cridar l'atenció de Thomson va ser que el fenomen no *tingués mà* ben definida, *But the magnetic influence on light discovered by Faraday depends on the direction of motion of moving particles* [THOMSON, 1856, p. 151]. En la rotació induïda, el medi no *tenia mà*: allò que determinava el sentit de rotació del pla de polarització de la llum era l'orientació del camp magnètic.

Val la pena de fer notar que les *moving particles* referides per Thomson són partícules del medi, encara que no especifiqui si són partícules de matèria normal o d'èter, i que els *luminous motions* són vibracions de les *moving particles*, vibracions transversals que justificaven la propagació de les ones de llum en un medi.

Per explicar l'efecte Faraday, Thomson va fer l'assumpció que en el medi on es manifesta el fenomen, *particles in a straight line parallel to the lines of magnetic force* [THOMSON, 1856, p. 151] tendien a moure's circularment entorn de les línies de força magnètica a causa del camp magnètic, tant si en el medi hi havia propagació de llum com si no n'hi havia. Els moviments de rotació de les partícules del medi formaven remolins entorn de les línies de força: eren els vòrtexs moleculars. Per a Thomson, els vòrtexs moleculars representaven la condició o estat físic que caracteritzava un camp magnètic en una regió de l'espai, tant si el camp era originat per imants com si ho era per corrents elèctrics.

Segons Thomson, la imatge dels vòrtexs moleculars havia de permetre de construir una teoria del camp amb fonamentació dinàmica. Les forces magnètiques es podrien explicar com el resultat d'interaccions dinàmiques dels moviments dels vòrtexs moleculars en el medi, en comptes de ser considerades el resultat d'interaccions estàtiques exercides a distància entre pols magnètics o entre corrents elèctrics. La inducció electromagnètica, en termes de vòrtexs moleculars, s'explicaria com el resultat de la resistència inercial a canviar la velocitat de rotació dels vòrtexs.

Per a Thomson, quan un feix de llum polaritzada travessava un medi sotmès a un camp magnètic paral·lel a la direcció de propagació de la llum, se superposaven els moviments de rotació de les partícules del medi (els vòrtexs moleculars), originats pel camp magnètic, amb els moviments de vibració -de les mateixes partícules- que s'associaven a la propagació de la llum, els *luminious motions*. La combinació dels moviments de vòrtexs amb les vibracions donava un moviment resultant a les partícules del medi que explicava la rotació del pla de polarització de la llum. El sentit de rotació del pla era determinat pel sentit de rotació dels vòrtexs moleculars, és a dir, per l'orientació del camp magnètic. Com més gran fos la distància recorreguda per la llum en el medi, més gran seria l'efecte de rotació del pla. I això és el que s'observava experimentalment en l'efecte Faraday.

L'afirmació rotunda amb què Thomson acaba l'argumentació sobre la rotació induïda traspua el convenciment que tenia de la veritat de la seva explicació.

"I think it is not only impossible to conceive any other than this dynamical explanation of the fact that circularly polarized light transmitted through magnetized glass parallel to the lines of magnetizing force, with the same quality, right-handed always, or left-handed always, is propagated at different rates according as its course is in the direction or is contrary to the direction in which a north magnetic pole is drawn; but I believe it can be demonstrated that no other explanation of that fact is possible" [THOMSON, 1856, p. 152].

Malgrat que les limitacions que imposava la incertesa en el coneixement de la naturalesa microscòpica dels constituents últims de la matèria, de l'èter i de l'electricitat, no van permetre que s'acomplís l'anhel de Thomson de construir una *true physical theory*, les argumentacions i les il·lustracions dinàmiques de Thomson basades en el model de vòrtexs moleculars van suposar l'obertura d'una via nova per a la concepció de l'electromagnetisme, basada en la idea de camp.

Tenint present que els fonaments de la teoria de Thomson sobre electricitat i magnetisme i la seva influència en Maxwell es troben en les

Mechanical Representation de 1847 i en *A Mathematical Theory of Magnetism* de 1851, es pot dir que les *Dynamical Illustrations* van ser els apunts d'un nou projecte, un esbós de programa, la insinuació d'un possible camí que menés cap a una autèntica teoria electromagnètica. El recull d'aquests apunts, d'aquests esbossos, d'aquestes insinuacions, per part de Maxwell, va ser suficient per impulsar la continuació de les idees seminals que Faraday havia donat per poder comprendre les interaccions electromagnètiques en termes del concepte de camp.

Amb les *Dynamical Illustrations* es va produir un relleu en el procés d'elaboració de la teoria del camp electromagnètic que Faraday havia començat. Thomson va conrear el terreny i el va deixar adobat perquè fructifiqués amb el treball de Maxwell.

5. Maxwell: desplaçament elèctric i teoria electromagnètica de la llum

Curiosament, el mateix any 1856, en què Thomson havia intentat d'oferir una teoria completa amb les *Dynamical Illustrations*, Maxwell creia que, tard o d'hora, s'arribaria a una *mature theory, in which physical facts will be physically explained, will be formed by those who by interrogating Nature herself can obtain the only true solution of the questions which the mathematical theory suggests* [MAXWELL, 1856, p. 159]. Aquesta idea, Maxwell la va exposar a *On Faraday's Lines of Force*, el primer article que va publicar sobre electromagnetisme i on va presentar una descripció geomètrica dels camps elèctric i magnètic: assimilava les línies de força dels camps i les línies de corrent elèctric a les línies de flux d'un fluid incompressible.

El primer intent de construir una teoria real, explicatòria i global dels fenòmens electromagnètics, Maxwell el va fer el 1861 a *On Physical Lines of Force (Physical Lines)*.

Les primeres notícies sobre la gestació de *Physical Lines*, les podem saber per una carta de Maxwell a Faraday de 9 de novembre de 1857, on s'acomiaa fent referència al nou camí insinuat per Thomson en *Dynamical Illustrations*:

"But there are questions relating to the connexion between magneto electricity and certain mechanical effects which seem to me opening up quite a new road to the establishment of principles in electricity and a possible confirmation of the physical nature of magnetic lines of force. Professor W. Thomson seems to have some new lights on this subject" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 133, p. 552].

El 24 de novembre del mateix any Maxwell discutia per carta amb Thomson la idea de la rotació de vòrtexs moleculars en un fluid perfecte¹⁸.

Physical Lines té quatre parts i es va publicar en dues tandes. A la primera tanda, es va publicar la part I, *The Theory of Molecular Vortices Applied to Magnetic Phenomena*, el març de 1861, i la part II, *The Theory of Molecular Vortices Applied to Electric Currents*, l'abril i maig del mateix any. A la segona tanda es van publicar les parts III i IV, *The Theory of Molecular Vortices Applied to Statical Electricity* i *The Theory of Molecular Vortices Applied to the Action of Magnetism on Polarized Light*, el gener i febrer de 1862.

Des del principi de *Physical Lines*, Maxwell deixa clara la concepció mecanicista: *I propose now to examine magnetic phenomena from a mechanical point of view*, i reconeix el treball previ:

"Professor William Thomson has given a *Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Forces*, by means of the displacements of the particles of an elastic solid in a state of strain" [MAXWELL, 1861-62, pp. 452-453].

En canvi, de la paternitat del model de vòrtexs moleculars no en fa esment fins ben bé al final de l'article, a la part IV, quan diu:

"Professor Thomson has pointed out that the cause of the magnetic action on light must be a real rotation going on in the magnetic field" [MAXWELL, 1861-62, p. 505].

La tardança a declarar aquesta paternitat és sorprenent i pot causar estranyesa, sobretot si es té en compte que hi ha detalls que indiquen que, en principi, Maxwell preveia que l'article només tingués les dues primeres parts. De totes maneres, qualsevol possible recel respecte de l'absència de referències a l'origen de la idea dels vòrtexs moleculars en les primeres parts de *Physical Lines*, el desfà una carta de Maxwell a Thomson de 10 de desembre del 1861. En aquesta carta Maxwell exposa en detall el contingut de la part III de *Physical Lines* -que es publicaria a principis de 1862- on va presentar la primera versió de la teoria electromagnètica de la llum i diu:

"Since I saw you I have been trying to develop the dynamical theory of magnetism as an affection of the whole magnetic field according to the views stated by you in the Royal Society's proceedings 1856 or Phil Mag 1857 vol 1 p 199 and elsewhere" [MAXWELL, *Letters I*, núm. 189, p. 692].

Aquesta referència de Maxwell a les *Dynamical Illustrations* de Thomson és d'una transparència definitiva. I el més probable és que la franquesa de la

seva relació estigués per sobre del deure de la citació, la pràctica de la qual en el segle XIX no era tan estesa com ara.

El concepte de desplaçament elèctric apareix per primera vegada a la introducció de la part III de *Physical Lines*, d'aquesta manera:

"In a dielectric under induction, we may conceive that the electricity in each molecule is so displaced that one side is rendered positively, and the other negatively electrical, but that the electricity remains entirely connected with the molecule, and does not pass from one molecule to another.

The effect of this action on the whole dielectric mass is to produce a general displacement of the electricity in a certain direction. This displacement does not amount to a current, because when it has attained a certain value it remains constant, but it is the commencement of a current, and its variations constitute currents in the positive or negative direction, according as the displacement is increasing or diminishing. The amount of the displacement depends on the nature of the body, and on the electromotive force; so that if h is the displacement, R the electromotive force, and E a coefficient depending on the nature of the dielectric,

$$R = -4\pi E^2 h \quad [a]$$

and if r is the value of the electric current due to displacement,

$$r = \frac{dh}{dt} \quad [b]$$

These relations are independent of any theory about the internal mechanism of dielectrics;" [MAXWELL, 1861-62, p. 491].

Fent la transcripció de la notació de Maxwell a la física d'ara, *l'electromotive force* correspon a la intensitat de camp elèctric. R , h , r corresponen, respectivament, al component Z de: la intensitat de camp elèctric, E_z , del desplaçament elèctric, D_z , i de la densitat de *corrent de desplaçament*, $\frac{\partial D_z}{\partial t}$. Com veurem, Maxwell va identificar el coeficient E -*depending on the nature of the dielectric*- amb la velocitat de la llum c .

Amb aquestes transcripcions i en notació vectorial, les equacions [a] i [b] les escrivim com

$$\vec{E} = -4\pi c^2 \vec{D} \quad [a']; \quad \vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad [b']$$

tot i que Maxwell no feia servir cap símbol especial per representar les derivades parcials¹⁹.

El signe negatiu en la primera relació que Maxwell va donar entre el component del camp elèctric R i el component del desplaçament elèctric h és problemàtic. Més tard, però, va donar la relació amb el signe positiu que coneixem ara²⁰.

Maxwell va ampliar la llei d'Ampère a la proposició XIV de la part III de *Physical Lines*:

"PROP. XIV. To correct the equations (9) of electric currents for the effect due to elasticity of the medium.

We have seen that electromotive force and electric displacement are connected by equation (105). Differentiating this equation with respect to t , we find

$$\frac{dR}{dt} = -4\pi E^2 \frac{dh}{dt} \quad (111)$$

showing that when the electromotive force varies, the electric displacement also varies. But a variation of displacement is equivalent to a current, and this current must be taken into account in equations (9) and added to r . The three equations then become

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} - \frac{1}{E^2} \frac{dP}{dt} \right) \\ q &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} - \frac{1}{E^2} \frac{dQ}{dt} \right) \\ r &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} - \frac{1}{E^2} \frac{dR}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

where p, q, r are the electric currents in the directions of $x, y,$ and z ; α, β, γ are the components of magnetic intensity; P, Q, R are the electromotive forces" [MAXWELL, 1861-62, p. 496].

Les equacions (9), Maxwell les havia donat a la part I de *Physical Lines* i representen la primitiva llei d'Ampère. Corresponen a les equacions (112) sense els termes del corrent de desplaçament, $\frac{1}{4\pi E^2} \frac{dP}{dt}$, $\frac{1}{4\pi E^2} \frac{dQ}{dt}$, $\frac{1}{4\pi E^2} \frac{dR}{dt}$. L'equació (105) a la qual es refereix Maxwell és l'equació que jo he designat per [a].

Amb la transcripció d' α, β, γ als components de la intensitat de camp magnètic H_x, H_y, H_z , de p, q, r als components de la densitat de *corrent total* (corrent de conducció + corrent de desplaçament) J_x, J_y, J_z , i fent servir

notació vectorial, la llei d'Ampère ampliada, representada per les equacions (112), s'escriu com

$$\vec{J} = \frac{1}{4\pi} \vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (112')$$

Seguint els passos de Maxwell, la darrera expressió es pot transformar en

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 4\pi \left(\vec{J} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)$$

la qual, deixant de banda el factor 4π , que té relació amb el sistema d'unitats, difereix en el signe menys de l'expressió que pren la llei d'Ampère en la física d'ara. L'origen d'aquest conflicte és en el signe menys de l'equació [a], $R = -4\pi E^2 h$, que ja he comentat.

La identificació de la llum com una ona que es propaga en el mateix medi en el qual es propaguen els fenòmens elèctrics i magnètics es mostra a la proposició XVI de la part III de *Physical Lines*, on Maxwell es proposa *To find the rate of propagation of transverse vibrations through the elastic medium* [MAXWELL, 1861-62, p. 499] .

Combinant les relacions que ja havia obtingut, Maxwell identifica el coeficient E relacionat amb l'elasticitat del medi magnetoelèctric (l'èter) amb la velocitat de propagació de vibracions transversals en el medi, V . Quan troba que $V = E = 31074000000$ mil·límetres per segon i s'adona de la proximitat d'aquest valor amb el de la velocitat de la llum que llavors es coneixia, arriba a la conclusió que *we can scarcely avoid the inference that 'light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena'* [MAXWELL, 1861-62, p. 500], on l'èmfasi és de Maxwell.

En *Physical Lines* no es pot parlar encara de teoria electromagnètica de la llum, perquè Maxwell ni tan sols no havia parlat de res que fes referència a ones electromagnètiques, enteses com la propagació d'un camp elèctric i d'un camp magnètic oscil·lants. L'autèntica teoria electromagnètica de la llum va venir amb els posteriors treballs de Maxwell, coneguts amb el nom de reformulació, presentats a *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* i en el *Treatise*.

6. Actituds d'oposició de Thomson a la teoria electromagnètica de la llum de Maxwell

L'octubre de 1884, Thomson va ser convidat a fer una sèrie de 20 conferències a la universitat Johns Hopkins de Baltimore (EUA) sobre dinàmica molecular i la teoria ondulatoria de la llum. Aquestes conferències són conegudes com les *Baltimore Lectures*.

Va ser en aquestes conferències que Thomson va manifestar per primera vegada rebuig a la teoria electromagnètica de la llum de Maxwell. Feia cinc anys que Maxwell havia mort i onze que s'havia publicat el *Treatise*. El tema de les conferències és prou suggerent per intuir quina era la qüestió de fons que Thomson volia tractar: la dinàmica de la interacció entre la matèria ordinària i l'èter.

Per a Thomson, era imprescindible de donar una explicació física de l'estructura de l'èter per poder construir allò que ell anomenava una *plain dynamics*. I aquesta estructura s'havia de trobar amb el model d'un èter sòlid elàstic. Des del primer moment, Thomson va deixar clara la importància de tenir una teoria de la llum i quina posició prenia sobre la *magnetic theory of light*. *The most important branch of physics which at the present makes demands upon molecular dynamics seems to me be the wave theory of light* [THOMSON, 1884, p. 9]. Aquestes van ser les paraules amb les quals Thomson va començar la primera conferència. Poc després, va treure l'artilleria pesant per atacar de ple la teoria de Maxwell:

"If I knew what the magnetic theory of light is, I might be able to think of it in relation to the fundamental principles of the wave theory of light. But it seems to me that is rather a backward step from an absolutely definite mechanical motion that is put before us by Fresnel and his followers to take up the so-called electro-magnetic theory of light in the way it has been taken up by several writers of late. In passing I may say that the one thing about it seems intelligible to me, I scarcely think is admissible. What I mean is, that there should be an electric displacement perpendicular to the line of propagation and a magnetic disturbance to both. It seems to me that when we have an electro-magnetic theory of light, we shall see electric displacement as in the direction of propagation [...] I merely say that in passing, as perhaps some apology is necessary for my insisting upon the plain matter of fact dynamics and the true elastic solid as giving what seems to me the only tenable foundation for the wave theory of light in the present state of our knowledge" [THOMSON, 1884, p. 12].

Sens dubte que és una declaració contundent pròpia de l'estil de Thomson, on apareix una de les conviccions que mai no va abandonar: en l'èter, a més

d'ones de llum transversals, també n'hi havia d'haver de longitudinals. Aquesta convicció era una conseqüència de pensar l'èter com un sòlid elàstic.

A la quarta conferència de Baltimore, Thomson va tornar a parlar de la teoria electromagnètica de la llum, a la qual es referia amb el punt d'ironia que denota l'expressió *the so-called*, i ho va fer de tal manera que hom pot pensar que s'atribuïa l'autoria d'identificar la velocitat de propagació de la llum amb la velocitat de propagació de senyals elèctrics:

"I am quite conscious [...] of what has been done in the so-called electromagnetic theory of light. I know the propagation of electric impulse along an insulated wire surrounded by gutta-percha, which I worked out myself about the year 1854 and in which I found a velocity comparable with the velocity of light" [THOMSON, 1884, p. 42].

Un element decisiu per entendre l'actitud de Thomson és la concepció aferrissada que tenia del mecanicisme. La seva professió de fe en els models mecànics, l'expressava dient:

"It seems to me that the test of *Do we or not understand a particular subject in physics?* is, *Can we make a mechanical model of it?*" [THOMSON, 1884, p. 111].

Els punts que més refús van provocar en Thomson són enumerats en una carta a George Francis FitzGerald (1851-1901) del 17 d'abril de 1885, on Thomson deia, *I have never yet felt any satisfaction in Maxwell's §§ 783, 784, 790, 791, 792, 645, 646, 794, 797, 798, 824 ... 829. I have never yet met any one who understood a definite dynamical foundation for § 783* [THOMPSON, 1910, p. 1038].

Els números indicats són els dels articles del *Treatise* de Maxwell del capítol que tracta de la teoria electromagnètica de la llum. L'equació que correspon a l'article 783 és l'equació de propagació de pertorbacions electromagnètiques en un medi dielèctric.

Quan l'any 1888 Thomson va fer una discussió sobre la inducció electromagnètica en circuits oberts, va fer referència al resultat de l'article 783 tot dient:

"[...] which cannot be right, I think (???) [sic], according to any conceivable hypothesis regarding electric conductivity, [...] being, as seems (?) to me, vitiated for complete circuits by the curious and ingenious, but, as seems to me not wholly tenable hypothesis which introduces, in § 610, for incomplete circuits" [THOMSON, 1888, p. 570-571].

L'article del *Treatise* designat per § 610 és on hi ha l'equació del corrent total, expressat per la suma del corrent de conducció amb el corrent de desplaçament.

A la introducció deia que l'actitud de Thomson és enigmàtica, complexa i plena de contradiccions, perquè les manifestacions de rebuig es van alternar amb mostres d'elogi. El primer elogi, el va fer a la *presidential addres* que va fer a la reunió de la *British Association for the Advancement of Science* que es va celebrar el setembre de 1889 a Newcastle. Allà, Thomson va dir que *Maxwell's 'electro-magnetic theory of light' marks a stage of enormous importance in electro-magnetic practice* [THOMSON, 1882-1911, pp. 489-490].

Pot sorprendre més encara que Thomson s'avingués a fer el pròleg de la versió anglesa de les *Untersuchungen* de Hertz (HERTZ, 1892), l'any 1893, i hi digués:

"But for electricity and magnetism Faraday's anticipations and Clerk Maxwell's splendidly developed theory have been established on the sure basis of experiment by Hertz's work" [HERTZ, 1892, p. XIII].

Segons explica Bruce J. Hunt²¹, hi va haver un apropament de Thomson a la teoria de Maxwell en el període comprès entre 1888 i 1894. Però el *festig* no va durar gaire i molt aviat hi va haver la ruptura definitiva entre Thomson i la teoria electromagnètica de la llum.

Thomson va ser a temps de conèixer la teoria dels electrons que Antoon Hendrik Lorentz (1853-1928) va construir a partir de 1878, i de ser testimoni de la manifestació experimental dels electrons en els tubs de raigs catòdics de William Crookes (1832-1919), amb la qual cosa es va clarificar el concepte de càrrega elèctrica, que va portar Maxwell de corcoll. I fins i tot va poder escoltar la ràdio que Guglielmo Marconi (1874-1937) va patentar el 1896, fent palpables les ones electromagnètiques estudiades per Hertz.

Aquestes experiències, però, no el van deturar de dir: *It is mere nihilism, having no part or lot in Natural Philosophy, to be contented with two formulas for energy, electromagnetic and electrostatic, and to be happy with a vector and delighted with a page of symmetrical formulas* [THOMPSON, 1910, p. 1065], fent referència a l'expressió matemàtica de les idees de Maxwell. Aquesta declaració d'antimaxwellianisme, Thomson la va fer a FitzGerald en una carta del 9 d'abril de 1896.

7. Conclusions

Thomson va influir en Maxwell a nivell de mestratge orientador, el va introduir a l'estudi de l'electromagnetisme i el va ajudar a situar-se en el context de la física del moment.

Maxwell va recollir de Thomson la destresa a fer servir analogies físiques i analogies matemàtiques per construir teories físiques, i va treure profit de les bases matemàtiques que Thomson havia elaborat per aplicar-les a la física.

La idea d'explicar els fenòmens elèctrics i els magnètics prenent com a fonament l'acció per contacte, l'origen del concepte de camp, Maxwell la va recollir de Faraday i de Thomson. De Faraday, en va copsar les idees físiques, de Thomson els conceptes matemàtics.

El model de vòrtexs moleculars de Thomson va ser la font d'inspiració que va menar Maxwell a unificar l'èter transmissor dels fenòmens elèctrics i dels magnètics amb l'èter lumínic en un sol èter electromagnètic, i a introduir el concepte de corrent de desplaçament i la consegüent teoria electromecànica de la llum.

Amb la reformulació, Maxwell va crear la teoria electromagnètica de la llum, en la qual va prescindir de l'estructura interna de l'èter electromagnètic, sense renunciar, però, a esbrinar-ne una explicació mecànica.

El refús de Thomson a la teoria de Maxwell no va ser per falta d'un model mecànic, sinó perquè el model mecànic de Maxwell era considerat incomplet i inacceptable, no era una *veritable teoria física*, perquè no explicava com era l'èter transmissor de la llum i de les ones electromagnètiques.

Thomson va estar sempre obsedit per un model d'èter sòlid elàstic i per les consegüents ones longitudinals.

Per a Thomson, el corrent de desplaçament no tenia sentit, només creia en corrents de conducció.

Thomson i Maxwell van compartir la representació dinàmica de la naturalesa, però amb diferències significatives. Thomson tenia una concepció mecanicista aferrissada i intransigent. Maxwell va concebre una mecànica dialogant i oberta.

L'afirmació que Thomson va fer a les *Baltimore Lectures*, *I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. If I can make a*

mechanical model I can understand it. As long as I cannot make a mechanical model all the way through I cannot understand; and that is why I cannot get the electro-magnetic theory [THOMSON, 1884, pp. 270-271], palesa que va participar d'una epistemologia ancorada en un mecanicisme recalcitrant.

Per a Maxwell, la teoria electromagnètica i la representació mecànica, en comptes de ser incompatibles eren complementàries.

Les paraules que Thomson va pronunciar al *Jubilee*, l'any 1896, quan es va celebrar el seu cinquantè aniversari com a professor a Glasgow, són ben significatives. Va dir:

"One word characterizes the most strenuous of the efforts for the advancement of science that I have made perseveringly during fifty-five years; that word is failure. I know no more of electric and magnetic force, or of the relation between ether, electricity, and ponderable matter than I knew and tried to teach to my students of natural philosophy fifty years ago in my first session as Professor" [THOMPSON, 1910, pp. 1072-1073].

No és veritat que el treball de Thomson fos un fracàs. Allò que va fracassar va ser una forma de llegir i d'interpretar la naturalesa. La naixent teoria electromagnètica va comportar la fi d'una manera d'entendre els fenòmens naturals que havia predominat en la física durant dos segles: el mecanicisme. Tot i que Maxwell la va formular pensant que seria possible d'articular-la dins el marc de la mecànica de Newton, tal com s'havia fet amb la teoria ondulatòria de la llum i amb la teoria dinàmica de la calor. L'electromagnetisme, però, se n'escaparia.

NOTES

1 M. Norton Wise discuteix breument la *prehistòria* del concepte de camp i dóna referències dels treballs que aprofundeixen en les primeres idees de camp. Vegeu WISE [1981]. Per tenir una panoràmica històrica de les teories sobre les interaccions, vegeu BERKSON [1974]. En DONCEL [1987] es pot trobar la història del camp electromagnètic des d'Oersted a Hertz. Una lectura crítica, amb notes i comentaris, dels treballs originals de Hertz fets entre 1887 i 1888 sobre la producció, recepció, reflexió, polarització i interferències amb ones electromagnètiques, es pot trobar en DONCEL i ROQUÉ [1990]. Per als treballs pioners de Faraday i de Thomson sobre el concepte de camp magnètic, vegeu GOODING [1980].

2 La biografia clàssica de William Thomson és THOMPSON [1910], que conté nombroses cartes i un apèndix amb la bibliografia completa de tots els llibres, comunicacions, articles científics i patents de Thomson. Hi ha enumerats 23 llibres -alguns de més d'un volum-, i les comunicacions, articles i conferències

fan un total de 661. Més recentment, s'ha publicat un extraordinari estudi sobre la vida i l'obra de *lord Kelvin*, SMITH & WISE [1989]. CAMPBELL & GARNETT [1882] és la biografia clàssica de Maxwell. Altres publicacions més modernes sobre Maxwell, són: EVERITT [1975] i HENDRY [1986].

3 Una anàlisi rigorosa, completa i molt il·lustrativa, sobre la introducció del concepte de corrent de desplaçament i la teoria electromagnètica de la llum es troba en SIEGEL [1991].

4 Un estudi exhaustiu i molt tècnic de la teoria electromagnètica de Maxwell es troba en BUCHWALD [1985]. Per conèixer el procés de difusió de la teoria electromagnètica de Maxwell, vegeu HUNT [1991].

5 Peter M. Harman ha fet una edició crítica i comentada dels articles científics i de les cartes de Maxwell. De moment s'han publicat dos volums, el corresponent als anys 1846-1862 es va publicar el 1990, i el corresponent als anys 1862-1873 el 1995. El tercer volum, corresponent als anys 1874-1879, s'està elaborant. Vegeu MAXWELL [*Letters I*], i MAXWELL [*Letters II*]. Per saber de la col·laboració de Thomson en la redacció del *Treatise*, vegeu MAXWELL [*Letters II*, núm. 383, p. 676; núm. 390, p. 689; núm. 402, p. 708 i núm. 420, p. 750]. Sobre la disposició del *Treatise* per part de Thomson, vegeu MAXWELL [*Letters II*, núm. 448, p. 839].

6 Ole Knudsen ha analitzat les concepcions matemàtiques i físiques de Thomson i ha fet una interpretació ponderada de les actituds de refús de Thomson respecte de la teoria electromagnètica de Maxwell. Vegeu KNUDSEN [1985], d'una manera especial les pàgines 171-179.

7 *Report of the Twentieth Meeting of the British Association for the Advancement of Science; Edinburgh in July and August 1850*. Londres, 1851, 2a part, p. 23.

8 Compareu THOMSON [1851, pp. 247 i 259] amb MAXWELL [*Letters I*, núm. 36, p. 210].

9 THOMPSON [1910, p. 26].

10 *Ibid.*, p. 134.

11 CAMPBELL & GARNETT [1882, p. 146].

12 *Murphys Electricity* fa referència a Robert Murphy (1806-1843), matemàtic nascut a Irlanda que passà per Cambridge i que més tard va ser examinador de física i de matemàtiques a la universitat de Londres. L'obra de què parla Maxwell és *Elementary Principles of the Theories of Electricity, Heat and Molecular Actions*, Cambridge, 1833.

13 Una anàlisi d'aquestes diferents concepcions de les analogies es pot veure en KNUDSEN [1985, pp. 166-168]. Per copsar de primera mà la manera com Maxwell interpretava les analogies, vegeu com ho exposa a la introducció de "On Faraday's Lines of Force" MAXWELL [1856, pp. 156-157].

14 Sobre l'intent de 1822, vegeu FARADAY [*Diary*, vol. I, p. 71]. Quant al de 1833, vegeu FARADAY [*Diary*, vol. II, p. 69-73].

15 FARADAY [*Diary*, vol. IV, pp. 263-267, arts. 7498-7536].

16 Vegeu THOMPSON [1910, pp. 148-149].

17 L'anàlisi més completa sobre l'efecte Faraday és KNUDSEN [1976].

18 MAXWELL [*Letters I*, núm. 137, pp. 560-562].

19 Quan Maxwell va escriure "Physical Lines" no existia el càlcul vectorial. En el *Treatise*, Maxwell va començar a fer servir una representació basada en la teoria de quaternions, iniciada el 1843 pel matemàtic irlandès William Rowan Hamilton (1805-1865), i molt escadusserament la representació vectorial creada, de forma sistemàtica, per l'americà Josiah Willard Gibbs (1839-1903) al final de la dècada dels setanta i per Oliver Heaviside (1850-1925) a la dècada dels vuitanta. Per als orígens del càlcul vectorial, vegeu DONCEL 1984.

20 L'ambigüitat en la introducció del corrent de desplaçament en "Physical Lines" és exposada de forma magistral per Joan Bromberg en un article que ja és un clàssic. Vegeu BROMBERG [1967].

21 Vegeu HUNT [1991, pp. 162-168].

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia primària

FARADAY, M. *Faraday's Diary: Being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigation Made by Michael Faraday during the years 1820-1862*. Thomas Martin (ed.), Londres, Bell & Soons, 1932-1936, 7 vols.

HERTZ, H.R. (1892) *Untersuchungen über die Ausbreitung der Elektrischen Kraft*. Leipzig, Johann Ambrosius Barth. Traducció anglesa: *Electrical Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity Through Space. With a preface by Lord Kelvin*. Nova York, Dover Publications, Inc., 1893.

MAXWELL, J.C. (1856) "On Faraday's Lines of Force". *Cambridge Philosophical Transactions*, 10, 27-83. Reimpresió en: *Scientific Papers*, I, 155-229.

MAXWELL, J.C. (1861-62) "On Physical Lines of Force". *Philosophical Magazine*, 21, 161-175, 281-291, 338-345; 22, 12-24, 85-95. Reimpresió en: *Scientific Papers*, I, 452-513.

MAXWELL, J. C. (1865) "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field". *Philosophical Transactions*, 155, 459-512. Reimpresió en: *Scientific Papers*, I, 526-597.

MAXWELL, J.C. (1868) "On a Method of Making a Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; with a Note on the Electromagnetic Theory of Light". *Philosophical Transactions*, 158, 643-657. Reimpresió en: *Scientific Papers*, II, 125-143.

MAXWELL, J.C. (1873) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 1ª ed., 2 vols. Oxford, Clarendon Press. Reimpresió, 3ª ed., Clarendon Press, 1981, Nova York, Dover Publications, Inc., 1954.

MAXWELL, J. C. (1890) *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. W. D. Niven (ed.), Cambridge, Cambridge Univ. Press. Reimpresió en 1 vol.: Nova York, Dover Publications, Inc., 1965.

MAXWELL, J. C. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell (1846-1862); (1862-1873)*. P.M Harman (ed.), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1990; 1995.

RANKINE, W. J. M. (1852) "On the Mechanical Action of Heat, Especially in Gases and Vapours". *Philosophical Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 20, 147-190.

THOMSON, W. (1847) "On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic and Galvanic Forces". *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, 2, 61-64. Reimpresió en: *Mathematical and Physical Papers (1882-1911)*, vol. I, 76-80.

THOMSON, W. (1851) "A Mathematical Theory of Magnetism". *Philosophical Transactions*, 141, 243-285.

THOMSON, W. (1856) "Dynamical Illustrations of the Magnetic and the Helicoidal Rotatory Effects of Transparent Bodies on Polarized Light". *Proceedings of the Royal Society*, 8, 150-158. *Philosophical Magazine*, 13(1857), 198-204.

THOMSON, W. (1872) *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*. Londres.

THOMSON, W. (1884) "Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light". En: R. Kargon & P. Achinstein (eds.), 1987, 7-263. Reedicció, amb l'addició d'alguns articles de Thomson: *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*. Londres, 1904.

THOMSON, W. (1888) "A Simple Hypothesis for Electromagnetic Induction of Incomplete Circuits, with consequent Equations of Electric Motion in Fixed Homogeneous or Heterogeneous Solid Matter". *Nature*, 38, 569-571.

THOMSON, W. (1882-1911) *Mathematical and Physical Papers*. Cambridge, 6 vols.

Bibliografia Secundària

BERKSON, W. (1974) *Fields of Force: The Development of a World View from Faraday to Einstein*. Londres, Routledge & Kegan Paul Ltd. Trad. castellana: *Las teorías de los campos de fuerza: Desde Faraday hasta Einstein*. "Alianza Universidad", 310. Madrid, Alianza Editorial, 1981.

BROMBERG, J. (1967) "Maxwell's Displacement Current and his Theory of Light". *Archive for History of the Exact Sciences*, 4, 218-234.

BUCHWALD, J.Z. (1977) "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics". *Historical Studies in the Physical Sciences*, 8, 101-136.

BUCHWALD, J.Z. (1985) *From Maxwell to Microphysics: Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*. Chicago, Univ. Chicago Press.

CAMPBELL, L. & GARNETT, W. (1882) *The Life of James Clerk Maxwell*. 1ª ed., Londres. Reimpresió: Nova York, Johnson Reprint Corporation, 1969.

CHALMERS, A.F. (1986) "The Heuristic Role of Maxwell's Mechanical Model of Electromagnetic Phenomena". *Studies in History and Philosophy of Science*, 4, 415-427.

DONCEL, M.G. (1984) "Orígens físics de l'anàlisi vectorial". En: *El desenvolupament de les matemàtiques al segle XIX*. Barcelona, Institut d'Estudis Catalans, Arxius de la Secció de Ciències, LXXV, 137-180.

DONCEL, M. G. (1987) "El campo electromagnético". En: *Historia de la física en el siglo XIX*. Madrid, Real Academia de Ciencias exactas, físicas y naturales, 59-125.

DONCEL, M.G. i ROQUE, X. (1990) *HEINRICH HERTZ. Las ondas electromagnéticas*. Bellaterra, Publicacions de la Univ. Autònoma de Barcelona i de la Univ. Politècnica de Catalunya.

EVERITT, C.W.F. (1975) *James Clerk Maxwell: Physicist and Natural Philosopher*. Nova York.

GOODING, D. (1980) "Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field". *British Journal for the History of Science* 13, 91-120.

HARMAN, P.M. (1982) *Energy, Force and Matter. The Conceptual Development of Nineteenth Century Physics*. Cambridge, Cambridge Univ. Press. Trad. castellana: *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Alianza Universidad, 653. Madrid, Alianza Editorial, 1990.

HARMAN, P. M. (Ed.) (1985) *Wranglers and Physicists: Studies on Cambridge Physics in the Nineteenth Century*. Manchester, Manchester Univ. Press.

HENDRY, J. (1986) *James Clerk Maxwell and the Theory of the Electromagnetic Field*. Bristol & Boston, Adam Hilger Ltd. 8.

HUNT, B. J. (1991) *The Maxwellians*. Ithaca (Nova York), Cornell Univ. Press.

KNUDSEN, O. (1976) "The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873". *Archive for History of Exact Sciences*, 15, 235-281.

KNUDSEN, O. (1985) "Mathematics and Physical Reality in William Thomson's Electromagnetic Theory". En: HARMAN [1985, 149-179].

SIEGEL, D. M. (1991) *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: Molecular vortices, displacement current, and light*. Cambridge, Cambridge Univ. Press.

SMITH, C. & WISE, M. N. (1989) *Energy and Empire: A biographical Study of Lord Kelvin*. Cambridge, Cambridge Univ. Press.

THOMPSON, S. P. (1910) *The Life of Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs*, 2 vols. Londres, Macmillan. Reimpressió: *Life of Lord Kelvin*. Nova York, Chelsea, 1976.

WHITTAKER, E. T. (1951) *A History of the Theories of Aether & Electricity*, 2 vols. Londres, Nelson. Reimpressió en 1 vol: Nova York, Dover Publications, Inc.,

WISE, M. N. (1981) "The Flow Analogy to Electricity and Magnetism. Part I: William Thomson's Reformulation of Action a Distance". *Archive for History of the Exact Sciences*, 25, 19-70.