

## WILLIAM THOMSON: D'INSPIRADOR A OPOSANT DE LA TEORIA ELECTROMAGNÈTICA DE MAXWELL

**Joaquim Pla Brunet**

Departament de Física i Enginyeria Elèctrica. Estudis Universitaris de Vic  
Centre d'Estudis d'Història de les Ciències (CEHIC). Universitat Autònoma de Barcelona

Paraules clau: Segle XIX, electricitat, magnetisme, llum, èter, Thomson, Maxwell.

William Thomson: from inspirer to opponent of Maxwell's electromagnetic theory

*Summary: This paper centres on the influence of William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) on James Clerk Maxwell's (1831-1879) work concerning electromagnetism. It also hints at 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. Thomson never came to accept either the displacement current concept or the electromagnetic theory of light. Thomson's rejection was a posteriori, when Maxwell had already died. Thomson's scientific importance justifies the analysis of his objections to Maxwell's theory.*

Key words: nineteenth century, electricity, magnetism, light, ether, Thomson, Maxwell.

### 1. Introducció

Dins la història de la ciència, alguns conceptes innovadors representen autèntiques revolucions del pensament científic: el concepte de camp és un cas paradigmàtic de revolució en la física. Els pilars creadors de la teoria de camps de les interaccions electromagnètiques són: Michael Faraday (1791-1867), William Thomson (*lord Kelvin*<sup>1</sup> 1824-1907) i James Clerk Maxwell (1831-1879). Faraday en representa el germen, Thomson, el conreu, i Maxwell, la fructificació.

La innovació radical de Maxwell és la introducció del concepte de corrent de desplaçament, amb la consegüent teoria electromagnètica de la llum i la possibilitat de generar ones electromagnètiques. Els treballs experimentals de Heinrich Hertz (1857-1894) sobre

<sup>1</sup> Kelvin és el nom d'un riu d'Escòcia, prop de Glasgow.

ones electromagnètiques, fets entre 1887 i 1888, van ser decisius per a confirmar la teoria de Maxwell i per a donar plena validesa al concepte de camp.

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. Per a Maxwell, ben sovint Thomson va fer d'oracle, i la seva relació és plena de varietat de facetes on es barregen el mestratge, l'amistat i l'admiració. Però Thomson, tot i haver estat una font d'inspiració de Maxwell, mai no va acceptar ni el concepte de corrent de desplaçament ni la teoria electromagnètica de la llum. L'equació que representa la llei d'Ampère generalitzada, 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. I justament aquesta equació és el cor de la teoria de Maxwell i de la possibilitat de generar ones electromagnètiques: sense corrent de desplaçament, a l'espai buit, no hi ha ones electromagnètiques.

L'actitud de Thomson respecte a la teoria de Maxwell és sorprenent, complexa i plena de contradiccions, i va alternar les crítiques amb els elogis. Per exemple, el 1893 s'avingué a fer el pròleg de la versió anglesa de les *Untersuchungen* de Hertz, *Investigacions sobre la propagació de la força elèctrica*, on s'exposen els resultats dels treballs sobre ones electromagnètiques. Thomson hi va escriure:

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: xiii).

El caràcter de protagonista singular de Thomson en la creació de la termodinàmica i l'electromagnetisme al segle XIX fa que la seva actitud de refús a punts de la teoria de Maxwell sigui mereixedora de consideració i d'anàlisi. Ens podem preguntar:

- Quines raons van portar Thomson a rebutjar la teoria de Maxwell?
- Quins arguments físics justifiquen l'actitud de refús?
- Per què els experiments d'Hertz no van ser decisius per a Thomson?

L'objectiu d'aquest article és posar de manifest el mestratge i la influència de Thomson en la iniciació de Maxwell a l'estudi de l'electromagnetisme, i presentar l'enigma de les posteriors actituds de refús de Thomson.

## 2. Thomson, mestre de Maxwell

La coneixença entre Thomson i Maxwell començà a les jornades de la *British Association for the Advancement of Science* celebrades a Edimburg el juliol i l'agost de 1850, en les quals Thomson va presentar un article sobre inducció magnètica en substàncies cristal·lines. En aquesta època Maxwell tenia 19 anys, acabava l'etapa d'estudiant a Edimburg i es

preparava per anar a Cambridge; Thomson en tenia 26 i ja era catedràtic a Glasgow des de 1846. 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 to Tyndall (whom I met at the British Assoc[iation] meeting at Edinb[urgh] [...]); 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[lerk] M[axwell] to make some preparations» (Thompson, 1910: 222).

Una carta de Maxwell de 16 de setembre de 1850 dirigida al seu amic Lewis Campbell 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, [...]» (Maxwell, *Letters I*, doc. 33: 205).

Alguns fragments de cartes són un exemple clar del paper de mestratge de Thomson respecte de Maxwell. La que es considera 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 College de Cambridge:

«Dear Thomson

Now that I have entered the unholy estate of bachelorhood I have begun to think of reading. [...]

Suppose a man to have a popular knowledge of electrical show experiments and a little antipathy to Murphys Electricity, 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*, doc. 45: 237).

Per tancar la mostra d'ascendència de Thomson en Maxwell, i a tall d'anècdota, podem llegir un fragment d'una carta de 19 de febrer de 1856 de Maxwell 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 professor of nat[ural] phil[sophy] at Marischal College Aberdeen» (Maxwell, *Letters I*, doc. 94: 396).

Aquest fet ens fa veure que la tradició de buscar recomanacions per aconseguir un càrrec ve de lluny i que Maxwell sabia triar un bon padri.

### 3. Thomson, efecte Faraday i vòrtexs moleculars

El 1845, arran d'un suggeriment de Thomson, Faraday observà que quan un raig de llum linealment polaritzat travessava una peça de vidre en presència d'un camp magnètic, el pla de polarització de la llum girava. Aquest fenomen, ara conegut per efecte Faraday, va establir un lligam nou entre llum, èter, magnetisme i matèria.

La descoberta que un camp magnètic feia girar el pla de polarització de la llum va reforçar el convenciment de Faraday que una línia de força magnètica 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 havia de ser 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 explicar l'efecte Faraday, Thomson va fer l'assumpció que en el medi on es manifestava el fenomen el camp magnètic feia que «particles in a straight line parallel to the lines of magnetic force» tendissin a moure's circularment entorn de les línies de força (Thomson, 1856: 151). 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 física que caracteritzava un camp magnètic. Les forces magnètiques serien el resultat d'interaccions dinàmiques dels moviments dels vòrtexs moleculars en el medi, en comptes de ser considerades com el resultat d'interaccions estàtiques exercides a distància.

Segons Thomson, quan un feix de llum polaritzada travessava un medi sotmès a un camp magnètic, el moviment de rotació de les partícules del medi (els vòrtexs moleculars originats pel camp magnètic) es superposava amb el moviment de vibració, de les mateixes partícules, associat a la propagació de la llum. La combinació dels dos moviments explicava la rotació del pla de polarització de la llum.

### 4. Maxwell, vòrtexs moleculars, desplaçament elèctric i teoria electromagnètica de la llum

Amb la intenció de construir una teoria mecànica explicativa dels fenòmens electromagnètics, Maxwell va recollir la idea de vòrtexs moleculars en «On Physical Lines of Force» (Maxwell, 1861-62). Aquest article té quatre parts, es va publicar en dues tandes, i els seus títols són prou significatius. El 1861 va sortir la primera tanda amb la part I, «The Theory of Molecular Vortices Applied to Magnetic Phenomena», i la part II, «The Theory of Molecular Vortices Applied to Electric Currents». La segona tanda conté 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», i es va publicar el 1862.

A «Physical Lines», per explicar les interaccions electromagnètiques Maxwell va concebre un medi magnetoelèctric, l'èter, format per molècules que al seu interior contenien un nombre molt gran de vòrtexs minúsculs. En cada part de l'article, però, Maxwell considerà una estructura diferent per als vòrtexs, la que més li convenia per explicar allò que es propo-

sava. El concepte de corrent de desplaçament va aparèixer a la part III, on els vòrtexs tenen estructura en forma de cel·les esfèriques elàstiques divided from each other by cell-walls composed of particles which are very small compared with the cells, and that it is by the motions of these particles, and their tangential action on the substance in the cells, that the rotation is communicated from one cell to another. [...], the particles which form the partitions between the cells constitute the matter of electricity. The motion of these particles constitutes an electric current; (Maxwell, 1861-62 = *Scientific Papers*: 489-490).

Val a dir que encara que aquestes paraules puguin fer pensar que les *particles* de Maxwell es poden assimilar als nostres electrons, Maxwell mai no va saber de forma precisa quina era la naturalesa de l'electricitat.

La introducció original de Maxwell del concepte de desplaçament elèctric i el de corrent de desplaçament és prou il·lustrativa per reproduir-la textualment:

«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,

$$R = -4\pi E^2 h;$$

and if  $r$  is the value of the electric current due to displacement,  $r = \frac{dh}{dt}$

*These relations are independent of any theory about the internal mechanism of dielectrics*; (Maxwell, 1861-62 = *Scientific Papers*: 491. Els èmfasis són meus).

Fent la transcripció de la notació de Maxwell a la de la física d'ara, l'*electromotive force* correspon a la intensitat de camp elèctric, i  $R$ ,  $h$ ,  $r$  equivalen, 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 tot seguit, 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 expressions<sup>2</sup>,  $R = -4\pi E^2 h$ , i  $r = \frac{dh}{dt}$  equivalen a  $\vec{E} = -4\pi c^2 \vec{D}$ , i  $\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ .

<sup>2</sup> Sobre la problemàtica del signe menys en la relació  $R = -4\pi E^2 h$ , vegeu Bromberg, 1967.

El concepte de corrent de desplaçament va permetre que Maxwell, a la proposició XIV de la part III de «Physical Lines», enunciés:

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

We have seen [...]. But a variation of displacement is equivalent to a current, and this current must be taken into account in equations (9) and added to  $r$ » [el component  $Z$  de la densitat de corrent de *conducció*]» (Maxwell, 1861-62 = *Scientific Papers*: 496).

Les equacions (9) representen la primitiva llei d'Ampère (només vàlida per a corrents estacionaris), que transcrita vectorialment és:

$$\vec{J} = \frac{1}{4\pi} \vec{\nabla} \times \vec{H}$$

on  $\vec{J}$  és la densitat de corrent de conducció i  $\vec{H}$  és la intensitat de camp magnètic. La primitiva  $\vec{J}$  i d'Ampère amb el terme del corrent de desplaçament afegit per Maxwell és la llei d'Ampère-Maxwell que, deixant de banda el factor 4 (relacionat amb el sistema d'unitats que es fa servir, es pot expressar com:

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

Fent una analogia entre l'energia potencial de la deformació elàstica dels vòrtexs i l'energia potencial del desplaçament elèctric en el medi magnetoelèctric, l'èter, Maxwell va identificar el valor de la velocitat de propagació d'una ona transversal en un medi elàstic, l'aire, amb el valor del coeficient  $E$  «depending on the nature of the dielectric». En adonar-se que el valor de  $E$  coincidia amb el de la velocitat de la llum a l'aire, va concloure 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 = *Scientific Papers*: 500. L'èmfasi és de Maxwell).

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 sense fer cap hipòtesi sobre un model mecànic de l'estructura interna del medi magnetoelèctric, de l'èter. La reformulació, deslligada de tota representació concreta de la constitució microscòpica de l'èter, és l'autèntica teoria electromagnètica de la llum. Tot el treball de Maxwell sobre electromagnetisme s'exposa en el llibre *A Treatise on Electricity and Magnetism (Treatise)*, publicat el 1873.

## 5. Refús de Thomson a la teoria electromagnètica de la llum de Maxwell

L'octubre de 1884, Thomson va donar una sèrie de vint conferències a la universitat

Johns Hopkins de Baltimore (EUA) sobre dinàmica molecular i teoria ondulatoria de la llum. Aquestes conferències són conegudes com les *Baltimore Lectures*.

Va ser en aquestes conferències on 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*.

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*. En començar les conferències, Thomson va dir que «The most important branch of physics which at the present makes demands upon molecular dynamics seems to me to be the wave theory of light.» (Thomson, 1884: 9). Tot seguit, va criticar de ple la teoria electromagnètica de la llum, sense fer cap esment directe, però, 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 that 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: 12).

Sens dubte, és una declaració contundent pròpia de l'estil de Thomson, en la qual es pot intuir un punt d'ironia en l'expressió *the so-called electro-magnetic theory of light*, i on també hi apareix una de les conviccions que Thomson no va abandonar mai: 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.

Una bona aproximació a les raons de Thomson per rebutjar la teoria de Maxwell es pot trobar en l'afirmació que va fer en una de les *Baltimore Lectures*, quan va dir:

«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: 206).

## 6. Algunes primeres conclusions

El model de vòrtexs moleculars de Thomson va ser la font d'inspiració que va menar Maxwell a introduir el concepte de corrent de desplaçament i a unificar l'èter magneto-elèctric amb l'èter lumínic en un sol èter electromagnètic.

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 el considerava incomplet i inacceptable. No portava a una *veritable teoria física*, ja que no explicava com era l'èter electromagnètic.

Thomson va estar sempre obsedit per un model d'èter sòlid elàstic i per les conseqüents 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. Per a Maxwell, la teoria electromagnètica i la representació mecànica en comptes de ser incompatibles eren complementàries.

## Bibliografia

- 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*, Londres. Reimpresió: (1969), Nova York, Johnson Reprint Corporation.
- 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 ROQUÉ, X. (1990), *Henrich Hertz. Las ondas electromagnéticas*, Bellaterra, Publicacions de la Univ. Autònoma de Barcelona i de la Univ. Politècnica de Catalunya.
- HERTZ, H. R. (1892), *Untersuchungen über die Ausbreitung der Elektrischen Kraft*, Leipzig, Johann Ambrosius Barth. Traducció anglesa: (1893), *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.
- KNUDSEN, O. (1976), «The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873», *Archive for History of Exact Sciences*, 15, 235-281.
- MAXWELL, J. C. (1861-62), «On Physical Lines of Force», *Philosophical Magazine*, 21, 161-175, 281-291, 338-348; 23, 12-24, 85-95. Reimpresió en: *Scientific Papers*, 451-513.
- 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. (1873), *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford, Clarendon Press, 2 vols. Reimpresió: 3a ed.(1981), Nova York, Dover Publications, Inc.
- MAXWELL, J. C. (1890), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, W. D. Niven (ed.), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2 vols. Reimpresió en 1 Vol.: (1965), Nova York, Dover Publications, Inc.
- MAXWELL, J. C. (1990-1995), *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell (1846-1862); (1862-1873)*, P. M Harman (ed.), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2 Vols.



- 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*, Londres, Macmillan, 2 Vols. Reimpressió: (1976), *Life of Lord Kelvin*, Nova York, Chelsea.
- THOMSON, W. (1847), «On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic and Galvanic Forces», *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, 2, 61-64. Reimpressió en: THOMSON, W. (1882-1911), *Mathematical and Physical Papers*, 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.
- THOMSON, W. (1884), «Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light». En: KARGON, R; ACHINSTEIN, P. (eds.) (1987), *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics*, Massachusetts, MIT Press, 7-263. Reedició, amb l'addició d'alguns articles de Thomson, com: (1904), *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, Londres.