

LA CONCEPTUALITZACIÓ DEL CAMP ELECTROMAGNÈTIC. ESQUEMA-RESUM D'UNA RECONSTRUCCIÓ DIDÀCTICA DE LA HISTÒRIA (1820-1888)¹

Manuel G. Doncel

Centre d'Estudis d'Història de les Ciències (CEHIC). Universitat Autònoma de Barcelona

Paraules clau: Electrostàtica i Magnetisme, Corrent elèctric, Oersted, Ampère, Electromagnetisme, Faraday, Maxwell, Camp electromagnètic, Hertz, Ones electromagnètiques.

The Electromagnetic field conceptualization. Sketch-summary of a educational reconstruction of the History (1820-1888)

Summary: We present the proposal of an instructional route, for students of secondary school and first university level, having the aim to work the electromagnetic field using its historical development as guiding thread.

The historical path is very complete because it goes from the first electric and magnetic phenomena presentation and their theoretical interpretations, till the empiric-mathematical conceptualisation of electromagnetic field with Maxwell and Hertz, going through the experiments and explanations of Oersted and Faraday such fundamental for the electromagnetic field elaboration.

Key words: Electrostatics, Magnetism, Electric current, Oersted, Ampère, Electromagnetism, Faraday, Maxwell, Electromagnetic field, Hertz, Electromagnetic waves.

0. Antecedents²

0.1 Experiments de magneto-electrostàtica (fins al segle XVIII)

Pedra imant, secció equatorial i meridional: atracció i repulsió de fragments. Iman-

¹ La meua opinió en general sobre «la història de les ciències com a eina didàctica i com a tema de batxillerat» es pot veure a DONCEL 1990 i 1992. És per això que en aquest simposi prefereixo aportar un intent concret del que allà proposava com a reconstrucció didàctica de la història, en un cas especialment difícil i necessari.

² Sobre aquests antecedents, vegeu TATON (1973, vol. 3) i millor el clàssic HEILBRON (1979).

tació. Acció selectiva sobre el ferro (el níquel o el cobalt).

Fregament de lacre i vidre, atracció de pènduls de medul·la de saüc, de petits fragments de paper o qualsevol substància. Dificultat d'observar la repulsió electrostàtica: electroscopi. Màquina electrostàtica i ampolla de Leyden: guspises de descàrrega.

0.2 Conceptualització quantitativa (Coulomb 1775)

Pols magnètics i càrregues elèctriques, atraccions i repulsions entre ells. Llei quadràticoinversa, anàloga a la de gravitació (Newton 1687).

De l'electrostàtica coulombiana (i anàlogament de la magnetostàtica) es van elaborar dues concepcions contraposades. Una considera que cada càrrega elèctrica produeix al seu voltant una «atmosfera» o «esfera d'activitat», que actuarà atractivament o repulsivament sobre qualsevol altra càrrega que s'hi introdueixi. Newton tenia personalment una concepció similar de la força gravitacional.³ Els newtonians, però, colpits per a senzillesa de la fórmula de Newton

$$FG = m m' / r^2, \quad (1)$$

i de l'anàloga de Coulomb

$$FE = e e' / r^2, \quad (2)$$

concebién aquestes forces com a «acció a distància» instantània entre masses o càrregues.

0.3 Nova eina experimental que introdueix el corrent elèctric

Del Galvanisme animal a la pila i les bateries de flascons (Volta 1800). Corrent elèctric continu i els seus efectes: calor i llum (Oersted 1813).⁴

1. Conceptualització empíricofilosòfica del camp electromagnètic: Oersted i Faraday 1820-1852

Els nous fenòmens amb corrents estables relacionaran, com veurem, l'electricitat amb el magnetisme. André-Marie Ampère, però, des de la seva concepció newtoniana (§0.4) crearà l'electrodinàmica, reduint tot el magnetisme a electricitat (els imants no són més que corrents elèctrics circulars, dins de plans perpendiculars al seu eix), i buscant una expressió matemàtica que doni la força d'interacció entre elements de corrent (1820-1827), anàloga a la

³ Vegeu, als preliminars del llibre dels *Principia*, les definicions 6, 7 i 8, i sobretot l'explicació que segueix.

⁴ Vegeu DONCEL (1987), p. 63.

fórmula de Coulomb de la interacció entre càrregues, (2). Aquesta electrodinàmica serà brillantment elaborada per Wilhelm E. Weber, utilitzant un cert model per als corrents, als quals considera com a càrregues positives i negatives en moviment. La seva «lleï bàsica general de les accions elèctriques» (1846) generalitza la de Coulomb, introduint dos termes correctius en què, a més de la distància r entre les dues càrregues, intervé la seva velocitat relativa v , i la seva acceleració relativa a , en relació amb la velocitat de la llum c :

$$F_{ED} = e e' / r^2 (1 - v^2/c^2 + 2ra/c^2). \quad (3)$$

Aquesta llei ret compte de tots els fenòmens elèctrics i magnètics del seu temps, sense necessitar cap concepte de camp, entre les càrregues en moviment.⁵

Veiem, doncs, el procés de pensament alternatiu, que va conceptualitzar el camp electromagnètic al llarg del segle XIX. Hi distingirem dues grans etapes. La primera, dins la primera meitat del segle en què es desenvolupava l'electrodinàmica, va introduir, a partir dels mateixos experiments històrics i de noves especulacions filosòfiques, la idea de «camp electromagnètic» com a domini espacial dotat de certes propietats estàtiques i dinàmiques, de moment tan sols qualitatives. La segona etapa geometritzarà aquestes propietats i formularà relacions precises entre elles, alguns efectes de les quals resultaran ser comprovats per nous experiments històrics.⁶

1.1 Propietats magnètiques dels corrents continus (Oersted 1820)⁷

Destaquem tres experiments històrics:

a) Experiment d'Oersted (juliol 1820): corrent de pila cap al nord i desviament de la brúixola col·locada a sobre i a sota.

b) Millorament d'Ampère (setembre 1820): agulla doble, «estàtica», i orientació perpendicular al corrent.

c) Perfeccionament de Faraday (setembre 1821): pol d'imant flotant en mercuri que gira contínuament al voltant del corrent (primer motor elèctric).

Considerem la diversitat d'especulacions filosòfiques que se'n fan:

a) Oersted al seus «Experimenta»: Els corrents son com un terbolí helicoidal magnètic, que s'estén al voltant del conductor.

b) Ampère: Acció a distància entre el corrent voltaic i els de l'imant.

c) Faraday al seu «Diary»: Els corrents estan envoltats de cercles magnètics; quan el conductor es corba en espira, els cercles s'aproximen per l'interior de l'espira i se separen per l'exterior... Això s'assembla a un imant amb dos pols, però es més bàsic.

⁵ Sobre Ampère i Weber, vegeu DONCEL (1987, 2 i 5). Una bona biografia d'Ampère és HOFMANN (1995).

⁶ Sobre el conjunt d'aquest procés, vegeu TATON (1973, vol 3), BERKSON (1981), DONCEL (1997), i DONCEL (1996a).

⁷ Vegeu DONCEL 1987, (pàgs. 60-71). Sobre Faraday i el seu Diari, vegeu MARTIN (1991, cap. 2).

1.2 Corrents induïts per variacions magnètiques (Faraday 1831)

Mencionem l'experiment previ i confós d'Ampère:

a) Ampère i Auguste de la Rive a Ginebra (setembre 1822) creuen veure un corrent constantment induït en un conductor per un corrent paral·lel. Així ho explica un llibre de l'escola amperiana enviat a Faraday pel propi Ampère.⁸

Considerem tres experiments clàssics de Faraday 1831:⁹

b) 29 d'agost: una mena de transformador amb nucli de ferro; en connectar i desconectar el primari s'indueixen corrents al secundari, de sentits oposats.

c) 24 de setembre: triangle magnètic de dos imants i nucli de bobina; al tancar i obrir el triangle s'indueixen corrents de sentits oposats.

d) 17 d'octubre: gran bobina sense nucli i imant de barra; en introduir i extreure ràpidament un pol del imant per l'interior de la bobina, s'indueixen corrents en sentits oposats.

Distingirem dues etapes en les especulacions de Faraday. Les primeres de mentalitat «amperiana», amb acció a petita distància:

(agost-novembre 1831):¹⁰

A. Es confirma la inducció d'un corrent per un altre corrent paral·lel. Aquest corrent, però, en contra del que indicaven els amperians, és tan sols temporal (en el moment de connectar el primari), i reapareix després en sentit oposat (en desconectar-ho).

B. Això es podria explicar si suposem que, a més del mecanisme d'inducció dels amperians, el corrent primari difon al seu voltant un «estat electrotònic», que s'oposa dinàmicament (com un contramoll), atura el corrent induït quan comença, i produeix un contracorrent quan cessa.

C. L'analogia dels fenòmens d'inducció produïts per connexió de corrents i per aproximació d'imants, confirma la suposició d'Ampère que els imants estan constituïts de corrents, que difonen també «estat electrotònic».

D. Els experiments d'inducció per aproximació progressiva d'imants a bobines exigeixen augments successius de l'«estat electrotònic», de manera que tan sols quan aquest varia s'indueix corrent en el conductor.

E. L'«estat electrotònic» ha d'influir tots els cossos que siguin al voltant dels corrents voltaics i dels imants. Si s'indueixen corrents quan aquest estat varia tan sols en els conductors, és perquè tan sols en els conductors pot desenvolupar corrents la tensió elèctrica que s'hi produeix.

Faraday sospita del sentit del corrent induït, segons la concepció amperiana, i realitza experiments per controlar-ho (8 i 9 desembre):¹¹

⁸ Demondferrand 1823, enviat a Faraday el juliol de 1815; vegeu ROMO-DONCEL (1994, pàgs. 299-301).

⁹ Faraday ERE, sèrie 1; per al Diari, MARTIN (1991, cap. 3); DONCEL (1987, p. 72).

¹⁰ Vegeu ROMO-DONCEL (1994, 1.2), i DONCEL (1997, 2).

¹¹ Vegeu ROMO-DONCEL (1994, 1.3), i DONCEL (1997, 4).

e) Imantació d'agulles pel corrent primari, i pel secundari induït en connectar el primari. La polaritat d'ambdues imantacions coincideix.

f) Sentit del corrent induït en un conductor rectilini en aproximar-lo al vorell d'un pol d'un imant de barra axialment i transversalment. El sentit és oposat en ambdós casos.

Ulteriors especulacions «antiamperianes» (a partir del 8 de desembre):¹²

F. Contra la concepció dels amperians sobre la inducció, completada amb el seu «estat electrotònic», el corrent induït no és paral·lel sinó antiparal·lel en connectar el primari, i paral·lel en desconnectar-lo.

G. No és possible fixar el sentit del corrent induït en un conductor en acostar-se a un imant pel criteri dels amperians. S'ha d'atendre a la manera com el conductor talla les «corbes magnètiques» que surten dels pols de l'imant.

H. Aquestes «corbes magnètiques» coincideixen amb els cercles magnètics que envolten els corrents. En connectar el primari aquests cercles surten transversalment de l'interior del conductor i s'eixemplen fins a tallar el secundari, i en desconnectar-lo es replieguen sobre el conductor primari, retallant el secundari en sentit oposat. D'aquesta manera, tots els fenòmens d'inducció de corrents poden explicar-se, àdhuc causalment, pel fet que el conductor talli les corbes magnètiques que omplen l'espai. Aquestes corbes magnètiques es transformaran en clares «línies de força magnètica» amb les especulacions arran del seu descobriment del diamagnetisme i del gir magnètic de la polarització lluminosa.

I. L'«estat electrotònic» resulta, doncs, innecessari per explicar els fenòmens; Faraday, però, com a filòsof no pot dubtar de la seva existència. Ulteriors especulacions sobre l'autoinducció de corrents (1834), la repulsió de les «línies de força elèctrica» als dielèctrics (1838), i el gir de la polarització lluminosa als diamagnètics (1845), li confirmarà aquesta existència.¹³

1.3 Camp electromagnètic amb propietats estàtiques i dinàmiques (Faraday 1852)¹⁴

Com a testament de la seva carrera experimental i especulativa, Faraday ens deixa un article, «Sobre el caràcter físic de les línies de força magnètiques» que, com diu ell mateix, «conté moltes coses de naturalesa especulativa i hipotètica». Les línies magnètiques s'hi presenten com a reals i dinàmiques, en analogia als corrents elèctrics. I com que aquests són causats (en els conductors i en les descàrregues de guspises a través de dielèctrics) per tensions electrostàtiques, al seu «estat electrotònic» li correspondrà el paper anàleg de fonament estàtic del dinamisme magnètic. Ens deixa, doncs, com a herència dues propietats magnètiques, «estat electrotònic» i «línies de força magnètiques», anàlogues a les dues elèctriques, «tensió electrostàtica» i «corrent elèctric».

¹² DONCEL (1997, 4 i 5).

¹³ Vegeu DONCEL (1991b, 2.2 a 2.4).

¹⁴ *Ibidem*, 2.5.

2. Conceptualització matemàtico-empírica del camp electromagnètic: Maxwell i Hertz 1855-1888

Maxwell serà 'encarregat de geometritzar com a vectors aquestes propietats, que de moment no eren més que conceptes qualitius. Ens trobem, però, en una època en què encara no està articulat l'anàlisi vectorial, mentre que sí que ho estava el càlcul de quaternions. Maxwell, amb el seu *Treatise* (1873), serà un dels més eficaços transformadors del quaternió en escalar i vector.¹⁵ En la nostra reconstrucció didàctica bastaria utilitzar, al seu propi estil, una idea intuïtiva de rotacional i divergència.¹⁶ Hem de saber també, com ho sabia molt bé Maxwell,¹⁷ que l'integral de la circulació d'una magnitud vectorial al llarg d'una corba tancada arbitrària L, és igual al flux del rotacional B de la magnitud a través d'un fragment de superfície S, limitat per L:

$$\text{rot } A = B ; \quad \square \int_S B \cdot ds = \oint_L A \cdot dl \quad (4)$$

Això es pot visualitzar, a partir de la intuïció maxwelliana de rotacional.

2.1 Camp electromagnètic amb propietats vectorials relacionades (Maxwell 1856)

Maxwell, en les seves primeres especulacions matemàtiques sobre el camp electromagnètic, es veu obligat a modificar l'herència del seu mestre Faraday. Considera les seves quatre propietats com a vectors. Prescindeix, però, dels nexes de causalitat i dels caràcters estàtic o dinàmic i, inspirat en el mateix Faraday, distingeix dos tipus de propietats vectorials: intensitats i quantitats.¹⁸ Considera que l'«estat electrotònic» (el futur vector A, o «potencial vector») és una intensitat, i que no és ni purament magnètica ni purament elèctrica, sinó prèvia a ambdues coses. A nivell elèctric s'en troba una intensitat, «la força electromotriu en un punt» (el futur vector E), i una quantitat, «la densitat de corrent» (futur J), que li és proporcional amb la constant de proporcionalitat *k*, «la conductivitat elèctrica» del medi. A nivell magnètic, però, hi ha tan sols les «línies de força magnètica», concebudes com a corrents. Ha d'introduir, doncs, una nova intensitat magnètica, «la força magnètica» (futur H), a la qual ha de ser proporcional la quantitat «inducció magnètica» (futur B), amb la constant de proporcionalitat μ , «la permeabilitat magnètica» del medi.¹⁹

¹⁵ Vegeu DONCEL (1984, 3.1).

¹⁶ Maxwell, *Treatise*, pàgs. 30-31.

¹⁷ En diem «teorema de Stokes» perquè aquest professor va posar com a problema demostrar-ho en la Smith's Price Examination de 1854, en què Maxwell va participar amb èxit. El formalisme del moment tractava aquests vectors per les seves components cartesianes.

¹⁸ Faraday havia parlat d'«intensitat i quantitat» d'un corrent, que és el que avui, amb menys claredat, anomenem «tensió i intensitat» del corrent.

¹⁹ Es podria dir que Faraday, el pare del camp magnètic, s'en va oblidar en el seu testament!

Maxwell introdueix aquests cinc vectors en una segona conferència a la Royal Society (11 de febrer de 1856), que serà publicada a finals del mateix any com a segona part, «Sobre l'estat electrotònic», del seu primer article sobre electromagnetisme, «Sobre les línies de força de Faraday». Classifica els cinc vectors d'aquesta manera:²⁰

	Intensitats	Quantitats
Electrotònic	A	
Magnètics	H	B
Elèctrics	E	J

I estableix les relacions matemàtiques que els lliguen entre si, i retransmet dels experiments i especulacions de Faraday. Podem transcriure aquestes relacions de la manera següent²¹:

$$\oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (5, 6)$$

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad \mathbf{J} = k\mathbf{E} \quad (7, 8)$$

$$\mathbf{E} = -\hat{\mathbf{A}} \quad (9)^{22}$$

L'experiment d'Oersted, origen de l'electrodinàmica d'Ampère, i de les primeres especulacions de Faraday sobre els cercles magnètics, ve ara quantitativament expressat per l'equació (7). Corrents de densitat \mathbf{J} produeixen al seu voltant forces magnètiques \mathbf{H} . La intensitat d'aquestes forces és tal que la seva circulació, o integral de \mathbf{H} al llarg d'una corba tancada L qualsevol que encercli els corrents, és igual al flux de corrent, o integral de \mathbf{J} a través d'una superfície S limitada per L .

Els experiments d'inducció de corrents, origen de les especulacions de Faraday sobre l'estat electrotònic, venen ara quantitativament expressats per l'equació (5), completada per les equacions (9) i (8). La formulació definitiva de Faraday, que en un conductor s'indueix un corrent sempre que talli corbes magnètiques, es va formular d'una manera més fenomenològica considerant un circuit tancat (diguem una espira) i afirmant que en ell s'indueix un corrent quan varia el nombre de corbes magnètiques que passen pel seu interior, o cosa que és més precisa, quan varia en el seu interior el flux magnètic. L'equació (5) ens dona per a qualsevol circuit tancat L la circulació de l'estat electrotònic $\hat{\mathbf{A}}$ en funció del flux

²⁰ Sobre el detall de la geometrització de l'estat electrotònic, vegeu DONCEL-LORENZO (1996). Veureu com introdueix aquesta classificació, utilitzant per a les components dels vectors lletres gregues i llatines, amb subíndex 0, 1, 2.

²¹ Vegeu DONCEL (1987, pàgs. 84-85), i en DONCEL (1991b, 3) traduccions didàcticament simplificades, que fan referència a les fonts.

²² Pròpiament, Maxwell escriu aquesta fórmula sense el signe negatiu que descobrirà més tard. No sembla important, però, subratllar aquest tema en la nostra reconstrucció didàctica.

d'inducció magnètica B que passa pel seu interior S . Si el flux de B varia en el temps, la seva variació fixarà la derivada temporal de l'estat electrostàtic \hat{A} , que segons l'equació (9) fixa la força electromotriu en cada punt del conductor E . Segons l'equació (8) aquesta força fixarà, en funció de la conductivitat del conductor, la densitat del corrent induït en cada punt del conductor J .

Utilitzant el teorema de Stokes, l'equació (4), Maxwell expressava les equacions (7) i (5) en la forma equivalent:

$$\begin{aligned} \text{rot } H &= J & (7') \\ \text{rot } A &= B & (5') \end{aligned}$$

De l'equació (5') es pot eliminar l'estat electrostàtic; derivant respecte del temps i utilitzant l'equació (9) resulta:

$$\text{rot } E = -B \quad (5'')$$

Maxwell, però, preferia no fer-ho.²³ Amb una al·lusió aproximada a la història que coneixem, l'equació (5') s'anomena avui de Maxwell-Faraday, i la (7') és una versió inicial incompleta de la que avui es diu de Maxwell-Ampère. Haurà de ser completada, per incloure fenòmens més fins d'interacció entre magnetisme i electricitat en absència de corrents de conducció J .

2.2 Camp electromagnètic amb propagació d'ones com les de llum (Maxwell 1862-1873)

L'estiu del 1861 Maxwell va tenir una intuïció genial, que introdueix el concepte de desplaçament elèctric, i arribà a donar fonament a la idea que les ones lluminoses constitueixen un fenomen electromagnètic. Aquest episodi, però, per central que sigui en el procés històric de conceptualització del camp electromagnètic, és molt difícil de reconstruir didàcticament. I això per tres raons: perquè la seva intuïció i la seva formulació estan dins d'un model d'èter electromagnètic complex i de complexitat creixent, perquè tan sols arriba a fonamentar que aquest èter gaudeix necessàriament de la bona relació entre densitat i mòdul de rigidesa per permetre ones elàstiques transversals amb la velocitat de la llum, i perquè les fórmules electromagnètiques que obté d'aquest model mecànic resulten amb signe oposat i conceptualització poc didàctica.²⁴

La nostra reconstrucció didàctica hauria d'inspirar-se, doncs, en la tercera gran publicació de Maxwell «Una teoria dinàmica del camp electromagnètic» de 1865, o en el seu

²³ Sobre aquest tema, vegeu DONCEL-LORENZO (1996).

²⁴ Em refereixo al model de «vòrtexs magnètics i boletes elèctriques» que Maxwell desenvolupà en el segon dels seus articles «Sobre les línies de força físiques». Les seves intuïcions de l'estiu de 1861 estan elaborades en les parts III i IV de l'article, publicades el 1862, en les quals aquests «vòrtexs» es tornen rotacionals elàstics. Per a una reconstrucció de les primitives intuïcions de l'estiu de 1861, vegeu DONCEL-PLA (1999, 1-5).

Tractat d'electricitat i magnetisme de 1873, en els quals dedueix ones com les lluminoses a partir de les equacions del camp electromagnètic.²⁵ Tal deducció, però, requereix inevitablement manipular l'equació diferencial de segon ordre, característica de la propagació d'ones planes. A un nivell més intuïtiu, i inspirant-se en la «Nota sobre la teoria electromagnètica de la llum», que Maxwell publicà el 1868, sens dubte amb el propòsit de fer accessibles els conceptes més bàsics del problema, la nostra reconstrucció didàctica es podria presentar com segueix.

Des de la intuïció genial de 1861 Maxwell cospa la necessitat d'introduir en la seva conceptualització del camp electromagnètic un sisè vector D , el «desplaçament elèctric». Copsat com a desplaçament elàstic dels medis dielèctrics, D serà proporcional a la força electromotriu E que actua sobre ells,

$$D = \epsilon E, \quad (10)$$

i la constant de proporcionalitat ϵ , que en la imatge elàstica correspondria al mòdul d'elasticitat, correspon elèctricament a una constant característica del medi dielèctric, que Faraday havia estudiat i avui anomenem «constant dielèctrica». L'interès de la intuïció rau en veure que la variació temporal D del desplaçament elèctric és una mena de corrent per al dielèctric, que s'ha d'addicionar al corrent de conducció J , per completar així l'equació de Maxwell-Ampère:

$$\text{rot } H = D + J, \quad (7'')$$

Per fi, el desplaçament elèctric concentra la càrrega elèctrica, el qual es formula

$$\text{div } D = \rho \quad (11)$$

on ρ és la densitat de càrrega elèctrica en cada punt de l'espai. Com que per al magnetisme no hi ha monopols lliures, l'equació anàloga serà

$$\text{div } B = 0 \quad (11)$$

A partir d'aquestes «equacions de Maxwell» és fàcil veure que en un dielèctric lliure de càrregues i corrents ($\rho = 0$, $J = 0$), poden formar-se ones electromagnètiques. En aquest cas, les equacions (5'') i (7'') poden escriure's, tenint en compte les (6) i (10):

$$\text{rot } E = -\mu H, \quad (5'')$$

$$\text{rot } H = \epsilon E \quad (7'')$$

Gràficament és fàcil veure, amb la idea intuïtiva maxwelliana de rotacional, que en un raig electromagnètic com el que dibuixa Maxwell en el *Treatise*, la variació espacial d' E defineix en el pla ortogonal un rotacional com és la variació temporal d' H , i viceversa. S'in-

²⁵ Vegeu la reconstrucció didàctica senzilla en DONCEL (1987, 4.3).

tueix també que el producte de la constant dielèctrica i la permeabilitat magnètica del medi defineix la velocitat de propagació, que té l'expressió $(\epsilon\mu)^{-1/2}$, coincideix amb la velocitat de la llum mesurada òpticament, i pot calcular-se electromagnèticament a partir de la seva expressió (per al buit coincideix amb la relació d'unitats electrostàtiques i electromagnètiques, mesurada per Weber abans de 1861).

Una altra conclusió conceptualment important és que aquesta constant dielèctrica ϵ intervé en les accions electrostàtiques, de manera que l'equació de Coulomb (2) no és exacta.²⁶

2.3 Producció i detecció d'ones electromagnètiques (Hertz 1888)

Heinrich Hertz va fer els anys 1887-1888 un seguit d'experiments que comprovaren l'existència del que avui anomenem «ones hertzianes», ones electromagnètiques en l'aire (o, cosa que per elles és el mateix, en l'espai buit). Això no vol dir que Hertz busqués aquestes ones. Més aviat, procedent de la concepció electromagnètica del seu mestre Hermann von Helmholtz, intentava respondre a qüestions concretes d'aquesta concepció, i és en aquest intent que es va trobar amb les ones hertzianes.²⁷

Les seves recerques en Karlsruhe comencen amb la posada en marxa del que avui anomenem un «oscil·lador de Hertz», és a dir, un conductor rectilini amb una interrupció reguladora en el centre (el «guspírer») en el qual oscil·len corrents elèctrics d'altíssima freqüència, de centenars de «megahertz» (milions d'oscil·lacions per segon). Amb elles aconseguen produir i estudiar corrents induïts en un circuit secundari, el «ressonador», col·locat àdhuc a alguns metres de distància de l'oscil·lador. En la seva concepció d'aleshores, això es produïa per acció a distància instantània. I així apareix publicat el 1887.²⁸

Amb aquests instruments Hertz enceta una carrera de descobriments que al llarg de l'any 1887 el porten a la conceptualització de les «ones inductives», per un procés que des de fa poc coneixem amb tot detall.²⁹ El seu primer pas va ser comprovar que també en materials dielèctrics es poden produir corrents d'alta freqüència amb «proprietats electrodinàmiques» (el que els maxwellians anomenarien «corrents de desplaçament»). Després de comprovar la formació en fils d'aram d'ones estacionàries, en un segon pas va arribar a comprovar, comparant la transmissió per fils d'aram i per l'aire, la velocitat finita de transmissió de l'acció inductora.

Finalment, en un tercer pas va comprovar que aquesta transmissió es fa mitjançant ones, amb les quals es capaç de formar i detectar ones estacionàries en l'aire. Aquesta detec-

²⁶ És una reflexió que Faraday havia elaborat als anys 30, i Maxwell s'afanya a comunicar-li per carta el 1861, setmanes després de la seva intuïció. Vegeu DONCEL-PLA (1999, 3).

²⁷ Per la relació entre Helmholtz i Hertz, vegeu DONCEL (1987, 5 i 6). Per a una ràpida presentació biogràfica de Hertz, DONCEL (1994).

²⁸ Vegeu una traducció castellana d'aquesta publicació a DONCEL-ROQUÉ, text 1.

²⁹ Vegeu DONCEL (1991a), HERTZ-DONCEL (1995), i DONCEL (1998).

ció, realitzada amb ones de deu metres de llargada en el seu auditori durant les vacances de Pasqua del 1888, constitueix una experiència èpica en la història de la física.³⁰

Càlculs teòrics, basats en les equacions de Maxwell, confirmen (i àdhuc corregeixen) els seus experiments.³¹ Cap al final del 1888 construeix oscil·ladors de més alta freqüència, que produeixen ones de metre, dirigides en forma de raigs, i amb un ressonador adequat retroba en aquests raigs electromagnètics totes les propietats dels raigs de llum.³² Repetit l'experiment en nombrosos laboratoris, queda comprovat que la llum és un fenomen electromagnètic.

Bibliografia

- BERKSON, William (1981), *Las teorías de los campos de fuerza*, Madrid, Alianza.
- DONCEL, Manuel G. (1984), «Orígens físics de l'anàlisi vectorial». A: CASTELLET, M. (ed.): *El desenvolupament de les matemàtiques al segle XIX*, Arxius de la Secció de Ciències, LXXV, IEC, Barcelona, pàgs. 137-180.
- (1987), «El campo electromagnético». A: *Historia de la física en el siglo XIX*, Madrid, Real Academia de Ciencias exactas, físicas y naturales.
- (1990), «Utilidades didácticas de la herramienta histórica». A: CODINA, R. i LLOBERA, R. (eds.) (1988), *Història, Ciència i Ensenyament* (Actas del III Simposium d'Història de les Ciències i de les Tècniques, SEHCT i UB) Barcelona, pàgs. 309-313.
- (1991a), «On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves», *Archive for History of Exact Sciences*, 41 (1991), pàgs. 1-27.
- (1991b), «En el bicentenario de Michael Faraday: Sus especulaciones sobre el «estado electrotónico», origen de nuestra teoría clásica de campos», *Revista Española de Física*, 5, n. 4, 44-57.
- (1992), «La Historia de las Ciencias como herramienta didáctica y como tema de bachillerato». A: A. ROCA (ed.), *Història i Filosofia de la Ciència i de la Tècnica a l'ensenyament secundari*, Casal del Mestre, Santa Coloma de Gramenet, pàgs. 263-272.
- (1994), «Heinrich Hertz, sin pretenderlo, descubrió en 1887 las ondas hercianas...», *Investigación y Ciencia*, núm. 208 (enero 1994), pàgs. 72-79.
- (1995), «A la lueur d'une étincelle», *Les Cahiers de Science et Vie*, 30 (Décembre 1995, «Heinrich Hertz»), pàgs. 45-66.
- (1996a), «The Concept of Field as Germ of Modern Physics». A: D. HOFFMANN; F. BEVILACQUA; R. H. STUEWER (eds.), *The Emergence of Modern Physics* (Proceedings of a Conference... Berlin 1995), Collana di Storia della Scienza, Università degli Studi di Pavia, pàgs. 45-59.

³⁰ Vegeu la seva publicació en DONCEL-ROQUÉ, text 2, i una reconstrucció imaginativa en DONCEL (1995).

³¹ Vegeu la seva publicació en DONCEL-ROQUÉ, text 3.

³² Vegeu la seva publicació a DONCEL-ROQUÉ, text 4.

- (1996b), «El campo electromagnético: de Faraday a las ondas hercianas». A: *De la ciencia triunfante a la pérdida de la certidumbre (1700-1900)*, Seminario «Orotava», Actas Año III 1997.
- (1997), «Reconsidering Faraday: The process of conversion to his magnetic curves». A: J. Z. BUCHWALD, «Aspects of Mid to Late 19th Century Electromagnetics», *Physis* 33 (1993) fasc. 1-3.
- (1998), «On Herz's Conceptual Conversion: from Wire Waves to Air Waves». A: D. BAIRD et al. (eds.), *Heinrich Herz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, Kluwer Academic Publishers, Boston 1998, pàgs. 73-87.
- DONCEL, Manuel G. & DE LORENZO, José Antonio (1996), «The electrotonic state, a metaphysical device for Maxwell too?», *European Journal of Physics*, 17 (1996), pàgs. 6-10.
- DONCEL, Manuel G. & PLA, Joaquim (1999), «Maxwell's intuition of electric displacement and his conversion to the electromagnetic theory of light». (en premsa).
- DONCEL, Manuel G. & ROQUÉ, Xavier (1990), *Heinrich Hertz, las ondas electromagnéticas* (Col·lecció CC2, Seminari d'Història de les Ciències), Publicacions UAB i Edicions UPC, Bellaterra.
- FARADAY, Michael (1839-1855), *Experimental Researches in Electricity*, 3 vols., Taylor and Francis, London.
- HEILBRON, John L. (1979), *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*, University of California Press, Berkeley.
- HERTZ, Heinrich, Memoirs M. HERTZ & C. SUSSKIND (eds.) (1977), *Erinnerungen, Briefe, Tagebücher (Memoirs, Letters, Diaries)*, San Francisco Press & Physik Verlag, Weinheim/San Francisco.
- HERTZ, H. G. & DONCEL, Manuel G. (1995), «Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887», *Archive for the History of Exact Sciences* 49, pàgs. 197-270.
- HOFMANN, James R. (1996), *André-Marie Ampère: Enlightenment and Electrodynamics*, Cambridge University Press.
- MARTIN, Thomas (1991), *Faraday i el descobriment de la inducció electromagnètica*, Vic (Barcelona), EUMO.
- MAXWELL, James CLERK, *Treatise 1873* (1965), *A Treatise on Electricity and Magnetism*, New York: Dover.
- ROMO, José; DONCEL, Manuel G. (1994), «Faraday's Initial Mistake Concerning the Direction of Induced Currents, and the Manuscript of Series I of his Researches», *Archive for History of Exact Sciences*, 47, pàgs. 291-386.
- TATON, René (1973), *Historia General de las Ciencias*, vol. 2 (1972) i 3 (1973), Barcelona, Destino.