

SOBRE LA DESCOMPOSICIÓ
ELECTROQUÍMICA

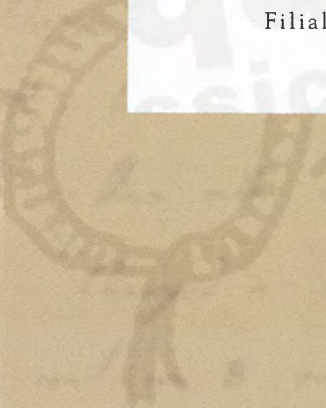
Michael Faraday

*Traducció, introducció i comentaris
d'Elisa Vallés i Elvira Gómez*

Clàssics de la Química 8

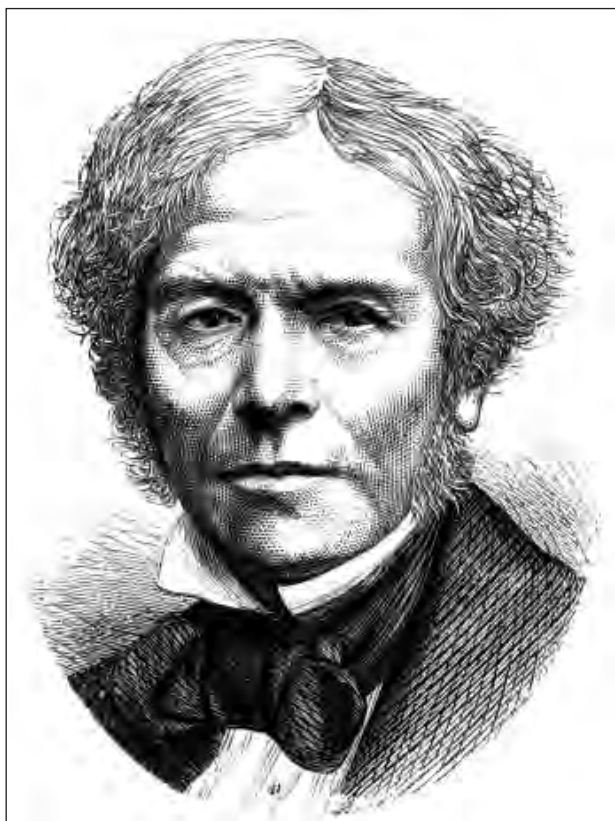
SOCIETAT CATALANA DE QUÍMICA

Filial de l'Institut d'Estudis Catalans



Michael Faraday

SOBRE LA DESCOMPOSICIÓ ELECTROQUÍMICA



Michael Faraday

SOBRE LA DESCOMPOSICIÓ ELECTROQUÍMICA

Michael Faraday

Traducció, introducció i comentaris

d'ELISA VALLÉS i ELVIRA GÓMEZ

Clàssics de la Química 8

SOCIETAT CATALANA DE QUÍMICA
Filial de l'Institut d'Estudis Catalans

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

Faraday, Michael, 1791-1867

Sobre la descomposició electroquímica. — (Clàssics de la química ; 8)

Bibliografia

ISBN 9788499652382

I. Vallés Giménez, Elisa, ed. II. Gómez, Elvira, ed.

III. Societat Catalana de Química IV. Títol

V. Col·lecció: Clàssics de la química ; 8

1. Faraday, Michael, 1791-1867 2. Científics — Gran Bretanya — Biografia

3. Electroquímica 4. Electròlisi

541.13

Editor de la col·lecció «Clàssics de la Química»: Ramon Sayós Ortega

© Traducció, introducció i comentaris d'Elisa Vallés i Elvira Gómez

Editat per la Societat Catalana de Química,

filial de l'Institut d'Estudis Catalans

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: desembre del 2014

Text revisat lingüísticament per la Unitat de Correcció
del Servei Editorial de l'IEC

Disseny gràfic: Maria Casassas

Compost per fotocomposició gama, s. l.

Imprès a Limpergraf, SL

ISBN: 978-84-9965-238-2

Dipòsit Legal: B. 25707-2014

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del *copyright*, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment i suport, incloent-hi la reproducció i el tractament informàtic, la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec comercial, la inclusió total o parcial en bases de dades i la consulta a través de xarxa telemàtica o d'Internet. Les infraccions d'aquests drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

TAULA

Presentació	7
1. Michael Faraday. Context, vida i trajectòria científica	11
2. Importància de les publicacions de Michael Faraday en la definició d'un nou camp de la química: l'electroquímica	59
3. Publicacions de Michael Faraday que condueixen a les lleis de Faraday de la descomposició electroquímica (extractes)	67
3.1. Identitat de les electricitats derivades de diferents fonts	67
3.2. Una nova llei de la conducció elèctrica. Generalització del poder conductor	72
3.3. Sobre la descomposició electroquímica	74
4. Lleis de Faraday i evolució de l'electroquímica	87
5. Científics rellevants que han contribuït al desenvolupament de l'electroquímica	91
6. Lectures complementàries	99

PRESENTACIÓ

En aquest nou volum dels «Clàssics de la Química» volem donar a conèixer un científic anglès considerat possiblement com l'experimentador més important del segle XIX, i possiblement de tots els temps, Michael Faraday. Els seus descobriments van canviar la forma de vida de la societat del segle XX.

Faraday era d'origen molt humil, fill d'un ferrer, i malgrat la seva falta d'estudis, es va anar educant de manera autodidacta gràcies a la lectura apassionada que feia dels llibres que enquadernava mentre treballava com a aprenent de llibreter des dels catorze anys. Malgrat aquests orígens, va arribar finalment a desenvolupar una carrera científica brillant, i va rebre un merescut reconeixement social i científic en la seva època, així com també de científics posteriors, com el mateix Albert Einstein, que va atribuir a Michael Faraday (experiments i conceptes), juntament amb James Clerk Maxwell (desenvolupaments matemàtics), una de les innovacions

teòriques més profundes de la física: la teoria del camp electromagnètic.

Faraday era una persona molt religiosa (sandemanià), cosa que va influir tant en la seva forma de viure —per exemple, rebutjant la presidència de la Royal Society o el grau de cavaller— com en la manera incansable i entusiasta d'encarar les seves investigacions.

La seva experimentació es va centrar principalment en les àrees de la química, l'electricitat i el magnetisme. Possiblement, la seva aportació més important es troba en les dues últimes, ja que va descobrir la inducció electromagnètica, i va construir el primer generador elèctric. També es va avançar dos segles amb la idea d'unificar tots els tipus de forces, que Einstein també va perseguir.

En el context d'aquesta col·lecció, aquest volum se centrarà, lògicament, en alguna de les seves aportacions més importants dintre del camp de la química, les quals també han tingut una influència molt important en la nostra societat. Faraday va participar en el descobriment de nous compostos (p. ex., el benzè), en la líquefacció de gasos (p. ex., CO_2 , SO_2 ...) i en el desenvolupament d'una nova disciplina: l'electroquímica. Se'l considera el fundador d'aquesta àrea de la química, on va donar les bases per al desenvolupament posterior de la indústria electroquímica. Aquesta darrera temàtica ha estat escollida com a nucli d'aquest llibre; en particular, el seu descobriment sobre les lleis de l'electròlisi. Si bé Faraday va ser un excel·lent escriptor i divulgador, la seva obra escrita es troba principalment en forma de col·leccions d'articles científics o transcripcions de conferències, documents que són massa extensos per fer-ne una traducció literal d'una selecció, tal com s'ha fet en els volums anteriors de la col·lecció. Les autores d'aquest volum, Elisa Vallés i Elvira Gómez, professores del Departament de Química Física de la Universitat de Barcelona, amb

una llarga experiència docent i investigadora en el camp de l'electroquímica, han decidit escollir les quatre seccions de la seva sèrie d'articles anomenada *Experimental Researches in Electricity*, publicada els anys 1833-1834, que els han semblat més rellevants per arribar a presentar de manera breu però fefaent les lleis de Faraday de l'electròlisi. També presenten la trajectòria personal i científica de Faraday, així com diferents aspectes relacionats amb el camp de l'electroquímica.

RAMÓN SAYÓS ORTEGA
Editor de «Clàssics de la Química»

1

MICHAEL FARADAY. CONTEXT, VIDA I TRAJECTÒRIA CIENTÍFICA

Repasant la biografia de Michael Faraday es fa palesa la gegantina personalitat que posseïa, capaç d'obrir nous camps de la física i de la química i d'establir les bases d'una nova disciplina, l'electroquímica, a la qual va donar forma amb un nou llenguatge, li va donar un vocabulari propi i la va quantificar amb les seves perdurables lleis. La seva recerca cobreix tants tipus de ciència, tants aspectes de cadascuna, que el seu llegat és aclaparador.

Michael Faraday va néixer en el si d'una família humil, va rebre escassa educació acadèmica i es va moure en un àmbit rebutjat per l'elit anglesa. A força de tenacitat i d'aptitud va saber obrir-se camí i gràcies a la seva important aportació es considera un dels científics més destacats del segle XIX. Faraday és l'exemple de superació, l'exemple que qui persegueix un objectiu amb perseverança i treball l'assoleix satisfactòriament.

Faraday és considerat per molts com un dels experimentadors més

grans de tots els temps, amb una genial intuïció i una portentosa capacitat científica. Era un excel·lent experimentalista que transmetia les seves idees en un llenguatge clar i senzill. A Faraday se li ha de reconèixer no només les seves contribucions a la ciència sinó també la seva emoció pel descobriment dels misteris de la natura i el desig de compartir-los mitjançant les seves conferències ben organitzades, per la qual cosa va ser molt respectat.

Hi ha hagut pocs científics en la història capaços d'unificar conceptes tan diversos, de donar salts conceptuals tan enormes, d'inventar experiments tan creatius superant dificultats econòmiques, socials i educatives tan grans. I pocs tan humils i tan conseqüents. Faraday pot servir d'inspiració per a gairebé tothom: com a exemple de superació d'un mateix, tenacitat i disciplina, intel·ligència, intuïció i capacitat de divulgació.

Faraday no va ser precoç, va néixer en la pobresa, però es va educar en un credo, l'estretor, cosa que li va permetre adaptar-s'hi bé. En la joventut va tenir la sort de ser contractat per Sir Humphry Davy a la Royal Institution. Fins als vint-i-un anys, la seva bona i mala sort van anar paral·leles i posteriorment la balança es va inclinar cap al costat favorable, i es va convertir en un home afortunat.

Michael Faraday va néixer el 22 de setembre de 1791 a Newington Butts, un poblet que ara és part de Londres; tercer de quatre fills d'una família humil i sandemaniana que provenia de Clapham, North Yorkshire, i que s'havia mudat a Newington Butts poc abans de néixer Michael. El pare era ferrador de cavalls i la mare, d'origen camperol.

Els avis de Faraday pertanyien a la secta fonamentalista dels sandemans o glasites des de principis de la dècada de 1760, secta que al llarg de la seva història mai no ha tingut més de mil adeptes. El

nom de *glasites* prové del seu fundador, un reverend anomenat John Glas, que es va separar de l'església d'Escòcia en la dècada de 1720, ja que considerava que les esglésies establertes havien abandonat la Bíblia. La secta és una variant del cristianisme, que intentava anar a les arrels primitives de la religió. La base doctrinal era la creença literal en les Sagrades Escripures i les normes bàsiques de conducta eren l'amor i un alt sentit de la comunitat. Es van fundar diverses esglésies glasites a Escòcia, i Robert Sandeman, el gendre de John Glas, va col·laborar en la seva difusió a Anglaterra i Amèrica, atès que es dedicava al comerç i la importació de vi. El pare de Faraday, James, es va unir a la secta, un dels valors de la qual era la fraternitat, de manera que quan James va tenir un daltabaix econòmic, els membres de la secta van ajudar-lo a traslladar-se a Newington, on va trobar feina a la ferreria d'un sandemanià. El desplaçament de la família a Newington no va tenir els efectes desitjats en l'economia de la família. Entre els cinc i els tretze anys, Faraday va rebre una instrucció molt bàsica. Ell mateix descrivia la seva educació com a molt corrent, ja que va consistir en poc més que rudiments de lectura, escriptura i aritmètica en una escola diürna, i va passar la resta del temps a casa o al carrer. Des de petit, Faraday va assistir amb la família a les reunions de la comunitat, en una casa prop del Barbican on se celebraven els oficis, i els aspectes bàsics de la doctrina eren molt presents en la seva vida. El 1809, la família de Faraday es va traslladar a Londres i un any més tard va morir el seu pare, de manera que els problemes econòmics de la família van augmentar i la mare va haver de tenir rellogats.

En el temps en què va néixer Faraday, a Anglaterra la mobilitat de classes era pràcticament inexistent i, per tant, les seves expectatives eren les mateixes que les que havia tingut el seu pare: convertir-se en aprenent, aprendre un ofici i criar fills que es convertissin més tard

també en aprenents. El 1804, amb els estudis elementals, es va col·locar com a noi de fer encàrrecs i repartia diaris entre els clients d'un llibreter anomenat George Ribeau. En els primers temps d'aquesta feina, la seva preocupació dels diumenges era lliurar els diaris molt d'hora per no arribar tard als oficis. Un artista francès anomenat John James Masquerier vivia al costat de Ribeau en la part alta de la botiga. Faraday s'encarregava de netejar la seva habitació i enllustrar-li les sabates. Masquerier li va prendre afecte i li va donar lliçons de perspectiva, que més tard li serien de gran utilitat, quan il·lustrava els apunts o les conferències. Ribeau necessitava un aprenent d'enquadernador, va decidir llogar Faraday com a aprenent perquè era espavilat, i amb ell va romandre set anys. Sota la tutela de Ribeau va fer un descobriment: els llibres. Faraday enquadernava llibres i reparava l'enquadernació de llibres usats, activitat en què va desenvolupar la seva habilitat manual. Aquest aprenentatge li va ser molt útil en anys posteriors, quan la destresa amb els aparells de laboratori es va fer determinant per al seu treball científic. Alguns llibres enquadernats per Faraday encara es conserven.

Amb el vistiplau de Ribeau, llegia i copiava fragments dels llibres que més li interessaven; l'accés als llibres el va fer un lector voraç. D'acord amb les seves declaracions, la seva passió per la ciència es va despertar després de la lectura de l'article «Electricity», escrit per James Tytler, quan estava enquadernant l'Encyclopædia Britannica. Tytler suposa l'existència d'un fluid les vibracions del qual podien explicar no només tots els efectes elèctrics sinó també els òptics i els tèrmics. Aquest article revisava i enfrontava les teories més ortodoxes: la de Benjamin Franklin (1706-1790), segons la qual els cossos en estat normal tenen un fluid elèctric i la seva electricitat, positiva i negativa, significa un augment o una disminució d'aquesta quantitat

de fluid, i la de Robert Simmer, que va anunciar, el 1759, davant la Royal Society, la teoria de l'existència de dues classes d'electricitat o de dos fluids, l'electricitat positiva i la negativa, que tot cos en estat normal té en quantitats iguals. Faraday va quedar fascinat amb l'electricitat i la controvèrsia li va crear el desig de verificar algun dels fenòmens descrits i, per això, gastant en materials el que no tenia, va construir, amb ajuda d'elements senzills, un petit generador electrostàtic (una màquina elèctrica de fricció), que encara es conserva a la Royal Institution de Londres, i que va ser l'inici del camí del genial experimentador.

A poc a poc, a mesura que es desenvolupava el seu aprenentatge, el jove ho va tenir més clar: no volia ser enquadernador, sinó científic. Però hi havia un problema, i era que amb la seva situació social no es podia imaginar fer realitat aquest somni. A començaments del segle XIX, l'accés a l'educació, i en particular a la ciència, no era fàcil. Afortunadament, Michael Faraday va estar envoltat durant la seva joventut de persones que van reconèixer el seu potencial i que el van ajudar de manera altruista. Un dia, passejant per la ciutat, Faraday va veure un anunci d'unes conferències vespertines de «filosofia natural» (terme utilitzat per designar la ciència pura en els segles XVIII i XIX), i va decidir assistir-hi. Però tenia dos problemes: d'una banda, George Ribeau havia de donar-li permís per anar a les conferències, i de l'altra, costaven un xifling cadascuna. Ribeau li va donar permís, i el seu germà gran, George, que era ferrer com el seu pare i que s'havia fet càrrec de la família en morir aquell, li va pagar algunes d'aquestes conferències. Les conferències les organitzava un joier i científic londinenc, John Tatum. De boca de Tatum, Faraday va conèixer Isaac Newton, William Nicol i molts d'altres. Allà, Faraday va fer amistat amb un grup de joves inquiets i emprenedors que s'autodeno-

minaven The City Philosophical Society i es reunien els dimecres a la nit a casa de Tatum, el qual després de les conferències obria la biblioteca als membres del grup. Va ser en aquest grup on Faraday va rebre una educació bàsica en ciències, amb cursos sobre electricitat, galvanisme, hidrostàtica, òptica, geologia, mecànica, química, astronomia i meteorologia. Molts d'aquests cursos eren observacions que Tatum il·lustrava experimentalment i que van fer augmentar l'afició de Faraday per la ciència. Es pot dir que el més important que va fer Tatum per la ciència en tota la seva vida va ser donar aquestes classes al jove Michael. El seu interès per la química es va despertar a través d'un petit tractat de divulgació de Jane Marcet, esposa d'un metge, titulat *Converses sobre química*, llibre que estava dirigit als assistents dels cursos que Humphry Davy impartia a la Royal Institution. El text no era una recopilació d'observacions, com acostumaven a ser els llibres de química de l'època, sinó un pla promogut per Davy, que creia que la química era la clau per descobrir els misteris de la natura. Considerava com un gran tot els fenòmens relatius a les reaccions químiques, l'electricitat, els fenòmens tèrmics i òptics, i va ser aquesta visió la que va atreure poderosament l'interès de Faraday.

A casa de Tatum, Faraday va conèixer diversos joves amb qui posteriorment va establir una estreta amistat, entre ells, Thomas Huxtable, un estudiant de medicina; Benjamin Abbott, oficinista, i Richard Phillips, químic i posteriorment director d'*Annals of Philosophy*. En aquell temps també va conèixer William Dance, un client de la llibreria de Ribeau i membre de la Royal Institution, que sentia simpatia pel jove i per la seva fam de coneixement científic, el qual va tenir l'amabilitat de fer-li un present que Faraday mai no hagués pogut pagar, entrades per a l'últim cicle de conferències de 1812 de Sir Humphry Davy a la Royal Institution.



FIGURA 1. Retrat de Michael Faraday, pintat per Henry Pickersgill a finals del període 1830-1840.

La Royal Institution era una institució científica fundada el 1799 per, entre d'altres, Benjamin Thompson (comte de Rumford) i Joseph Banks (president de la Royal Society) amb el propòsit de «difondre el coneixement i facilitar la introducció d'avenços i invencions mecàniques útils, i l'ensenyament, mitjançant cursos de conferències filosòfiques i experiments, de l'aplicació de la ciència als objectius usuals de la vida». Es va convertir ràpidament en un centre de moda per a la difusió del coneixement científic mitjançant conferències, principalment les que Davy havia impartit des de 1801.

Humphry Davy (1778-1829), el qual va ser aprenent d'apotecari, encara que els seus interessos eren més amplis, com les matemàtiques i la filosofia, després de llegir el 1797 el text de química d'Antoine



FIGURA 2. La Royal Institution de Londres, el 1838. Pintura de Thomas Hosmer Shepherd.

Lavoisier, va decidir dedicar-se a la química. Amb vint-i-un anys era superintendent d'una institució dedicada a l'estudi de les propietats terapèutiques dels gasos. Va realitzar diferents experiments en relació amb la calor, no estava d'acord amb la teoria del calòric de Lavoisier i defensava que la calor havia de ser alguna forma de moviment. En els seus experiments amb gasos va descobrir l'òxid nítrós i les seves estranyes propietats, les quals va investigar sobre si mateix. Si s'inhalava aquest gas, es produïa una molesta sensació d'intoxicació, mentre que si se'n respirava una mica, produïa plor o riure (se'l va batejar com el *gas del riure*), cosa que va fer que durant un temps l'ús del gas estigués de moda en les festes de societat. Va ser el primer anestèsic químic. Davy va destacar com a excel·lent conferenciant i el 1801 ja s'havia incorporat a la Royal Institution com a assistent de química i director del laboratori. Entre 1801 i 1813 Davy va treballar molt sobre química agrícola, encara que la seva veritable fama la va aconseguir en el terreny de l'electricitat. Després que William Nicholson i el seu amic Anthony Carlisle descompongessin la mo-

lècula d'aigua per mitjà de l'electricitat, Davy es va interessar per l'efecte d'aquesta sobre altres compostos químics. Se sospitava que substàncies com la calcària, la magnèsia, la potassa o la sosa conteni- en elements metàl·lics en la seva estructura que mai no s'havien aï- llat. Havia estat impossible alliberar-los per calor o per reaccions de substitució amb d'altres metalls. Davy va proposar que el que no es podia separar mitjançant una reacció química es podria fer per cor- rents elèctrics. Va construir la bateria més potent feta fins aleshores amb 250 plaques i, aplicant el corrent a les sals foses, els resultats van ser espectaculars. El 6 d'octubre de 1807, el corrent que travessava la potassa fosa va alliberar un metall que Davy va anomenar *potassi*. Les petites boletes del brillant metall descomponien la molècula d'aigua, atesa l'avidesa del metall per l'oxigen, mentre que l'hidro- gen que quedava s'inflamava. Una setmana després, amb el mateix procediment, Davy va aïllar el sodi de la sosa. També va aïllar el bari, l'estranci, el calci i el magnesi. Així mateix, a causa fonamental- ment del treball de Davy sobre l'aïllament electroquímic del sodi i el potassi com a elements químics, la Royal Institution s'havia guanyat una reputació com a centre d'investigació.

Davy i Louis Joseph Gay-Lussac refutaren les tesis de Lavoisier centrades en la idea que tots els àcids conteni- en oxigen; de fet, la paraula *oxigen* significa 'generador d'àcids'. Els treballs de Davy sobre l'àcid muriàtic (àcid clorhídric) van ser excel·lents, ja que conclouien que un dels àcids corrents més forts no contenia oxigen. Va identi- ficar el clor, que fins aleshores es creia que era un òxid. El nom de *clor* va ser suggerit per Davy, derivat del vocable grec *verd*, a causa del color verdós del gas.

El març i l'abril de 1812, Faraday va assistir a les quatre últimes conferències que Davy va pronunciar a la Royal Institution. Fara-

day va quedar absolutament subjugat per Davy, que era un divulgador de primera categoria. Va passar en net els seus apunts i, després de discutir el contingut amb els membres de The City Philosophical Society, els va regalar enquadernats a Davy, a qui va sol·licitar una feina a la Royal Institution en alguna ocupació relacionada amb la ciència. Faraday desitjava escapar del comerç, que considerava depravat i egoista, i consagrar-se al servei de la ciència, ja que estava convençut que feia els seus cultivadors amables i generosos. Davy es va entrevistar amb ell però li va aconsellar seguir amb el seu treball d'enquadernador, ja que li va dir que la ciència era una amant capritxosa i, responent amb un somriure a les idees de Faraday sobre els sentiments morals superiors de la filosofia, li va indicar que l'experiència d'uns quants anys canviaria les seves idees sobre això. Tanmateix, a finals d'octubre, Davy va patir greus ferides als ulls, en explotar-li a la cara una combinació de clorurs de nitrogen. Com que les seves ferides li impedièn veure, Davy va recordar la petició de l'enquadernador i va recórrer a Faraday com a amanuense. Faraday va prendre possessió de la plaça amb vint-i-un anys amb un sou de 25 xílings per setmana amb dret a dinar, sou inferior que el que havia estat percebent com a enquadernador, encara que aquesta pèrdua de poder adquisitiu no el va preocupar. Així va començar la fulgurant i important carrera de Faraday com a investigador, primer només com a químic i, més tard, com a geni de l'electricitat. Durant tota la seva vida es va mantenir fidel a aquesta institució que el va acollir i li va donar l'oportunitat de desenvolupar la seva passió. D'altra banda, la relació amb el seu mestre i protector Davy va ser estreta i fèrtil, encara que amb el temps no es va veure exempta de problemes, derivats d'una certa rivalitat del mestre davant la genialitat del pupil. Tanmateix, és just recordar la famosa frase que va

pronunciar Davy: «el meu gran descobriment ha estat Michael Faraday».

El 19 de febrer de 1813, William Harris, superintendent de la Royal Institution, va sentir un fort soroll a la sala de conferències. Va trobar William Payne, l'ajudant de laboratori, i John Newman, el fabricant d'instruments, embrancats en una disputa. Newman acusava Payne de no complir les seves obligacions i d'ajudar el professor de química, William Thomas Brande. A més a més, Newman es va queixar que Payne l'havia colpejat, acusació refermada pels administradors de la institució, de tal manera que el 22 de febrer Payne va ser acomiadat. En aquest moment, Davy va oferir a Faraday el lloc d'ajudant de química. Va ser nomenat ajudant l'1 de març de 1813. Quan l'octubre Davy va decidir emprendre una gran gira per Europa, va convidar Faraday a acompanyar-lo en qualitat d'auxiliar d'experiments. Faraday, que no s'havia allunyat més de dotze milles de Londres, va tenir l'oportunitat de viatjar per Europa amb el químic anglès més brillant de l'època, tal com feien els fills de les famílies benestants angleses, que solien concloure la seva educació emprenent una gran gira per Europa.

Encara que les guerres amb França impediessin aquests viatges, Napoleó va concedir un permís especial perquè Davy viatgés per França i Itàlia per assumptes relacionats amb la ciència. El principal objectiu del viatge de Davy era facilitar les relacions amb científics del continent i visitar diferents laboratoris.

El diari d'aquest viatge revela Faraday com un inquiet observador, impacient per aprendre de tot el que veu i de tot el que se li explica. Recull la pobra impressió que li causa França en desembarcar, l'excessiva sumptuositat dels pisos de París o l'humor ombrívol de Napoleó, així com la descripció del paisatge, la gent i els costums de les regions

que visitaven. L'únic inconvenient que va sorgir va ser que l'ajudant de cambra de Davy en l'últim moment va refusar viatjar i Davy va demanar a Faraday que el substituís fins que n'acongués un altre a França, cosa que no va succeir. El jove Michael va haver de suportar el tracte despectiu de la dona de Davy, que el tenia per un criat.

Instal·lats a París, el clímax va arribar quan el novembre tres dels científics francesos més distingits, André-Marie Ampère, Nicolas Clément i Charles Desormes, van cridar Davy per mostrar-li una substància obtinguda d'una alga marina, substància descoberta dos anys abans i sobre la qual existia una certa controvèrsia. Quan aquesta substància s'escalfava, es produïen uns vapors violacis que donaven uns cristalls foscos en condensar. Els químics francesos postulaven que es comportava de manera anàloga al clor, però la qüestió era que no hi havia acord unànime sobre la naturalesa del clor.

Faraday va tenir per primera vegada l'oportunitat de viure un capítol important de la investigació química. Era una qüestió més transcendental que el descobriment d'un element, es discutia sobre una creença molt assentada i sostinguda per la major part dels químics, i en especial dels francesos, com és que tots els àcids contenien oxigen. Com que el clor formava un àcid quan es combinava amb l'hidrogen, es mantenia que havia de ser un òxid. Davy va demostrar de manera concloent que tant el clor com el iode eren elements. Davy, encara a París, va escriure a la Royal Society de Londres, descrivint la nova substància per a la qual va proposar el nom de *iode* (del grec, corresponent al color del vapor).

Passat Nadal es van dirigir a Itàlia, i a cada ciutat que visitaven es reunien amb els químics més importants, els quals portaven a Davy mostres, perquè ell, utilitzant el seu laboratori portàtil, intentés determinar-ne la composició. A Florència van tenir l'ocasió d'utilitzar

una gran lent pertanyent al duc de Toscana amb la qual van demostrar que el diamant és carboni pur, una idea molt difícil d'acceptar pels científics de l'època. Focalitzant els raigs solars sobre un diamant contingut en un recipient ple d'oxigen pur, el diamant va començar a cremar transcorreguda una hora. Van cremar completament el diamant i van demostrar que en el recipient només hi havia diòxid de carboni i l'excés d'oxigen sense reaccionar. Així, van concloure que el diamant no és químicament diferent del grafit o del negre de fum, sinó que només és carboni present en una forma cristal·lina diferent.

A Milà, amb vint-i-tres anys, Faraday va conèixer Volta, que ja s'acostava als setanta. A Nàpols van escalar el Vesuvi, atès que un dels objectius del viatge era l'anàlisi de les seves laves volcàniques. La reina de Nàpols va mostrar a Davy algunes restes arqueològiques de la ciutat romana de Pompeia, restes que Davy va analitzar. Amb aquesta anàlisi potser per primer cop la química es va utilitzar com a eina de l'arqueologia.

Faraday no seria el mateix després d'aquest viatge de divuit mesos. A les moltes cartes que va escriure a la seva mare durant el viatge hi ha una constant: la consciència de la seva pròpia ignorància; com més veia, escoltava i llegia, més s'adonava del poc que sabia. Va ser també durant el viatge, coneixent molta gent i veient a quina finalitat destinaven el coneixement científic, que Faraday va perdre part de la seva ingenuïtat. Va adonar-se que, per a alguns, el coneixement només té sentit com a mitjà per obtenir un fi, i que sovint aquest coneixement es converteix en eina per a finalitats fosques. El llarg viatge va acabar quan Napoleó va escapar del seu exili a l'illa d'Elba.

De tornada a Anglaterra, l'abril de 1815, Michael Faraday era més savi, menys ingenu però exactament igual d'íntegre i decidit a dedi-

car la seva vida a la ciència. Davy va ser nomenat administrador i vicepresident de la Royal Institution i en la primera reunió amb la Junta d'Administradors va decidir que Faraday fos contractat de nou i que se li concedís allotjament a l'edifici, de manera que va ocupar dues habitacions en els pisos alts de la Royal Institution. A partir d'aquest moment la carrera de Faraday va prosperar i a finals de 1815 ostentava el càrrec d'ajudant i superintendent dels aparells de laboratori i de la col·lecció de minerals. El 1821 se'l va nomenar superintendent de la casa i del laboratori; després d'obtenir aquest ascens es va casar, el juny de 1821, amb Sarah Barnard. Sarah era germana d'un dels membres de The City Philosophical Society i filla d'un pastor sandemanià, Edward Barnard, que era un notable de l'església i un pròsper orfebre londinenc. Les dues famílies es coneixien a través de l'església. Michael tenia vint-i-nou anys i Sarah, vint-i-un. Després del casament van ocupar les habitacions que tenia assignades Faraday a la Royal Institution, i allà van viure durant gairebé quaranta anys; no van tenir fills. Sarah era una dona il·lustrada i com-



FIGURA 3. Estudi de Michael Faraday a la Royal Institution. Pintura de Harriet Jane Moore.

prensiva, que va ser el coixí de la ment de Faraday; pertanyia a la congregació dels sandemanians i Michael, un mes després del casament, va fer la seva professió de fe. Això l'obligava a viure segons l'estricta disciplina de la secta.

No obstant això, la vida de Faraday va canviar el 1821 per un assumpte completament diferent del seu matrimoni. Fins aquest moment Faraday havia tingut fortuna en tot, el seu mentor Sir Humphry Davy s'havia portat com mereixia el caràcter del jove, i la seva intel·ligència i integritat li havien proporcionat amics i admiració dels que l'envoltaven. Però el 1821 s'enfrontaria al que probablement seria l'episodi més desagradable de la seva vida.

L'arrel d'aquest episodi havia aparegut a Copenhaguen un any abans: el 21 d'abril de 1820 el físic i químic Hans Christian Ørsted, durant una conferència sobre magnetisme, va mostrar que, en encendre un circuit elèctric prop d'una agulla imantada, aquesta es movia. Ørsted, a partir d'aquest moment, començà a realitzar experiments sobre la relació entre electricitat i magnetisme, i va arribar a la conclusió que existia una connexió entre els dos fenòmens. El descobriment tenia impressionada la comunitat científica. La publicació va generar un interès enorme, tant pels seus aspectes formals com pràctics.

Si un circuit elèctric podia fer girar un imant, es podrien utilitzar corrents elèctrics per produir un gir constant en imants, és a dir, un motor, però sense combustió, un motor elèctric. Un químic i físic anglès, William Hyde Wollaston, en aquell temps vicepresident de la Royal Society, va decidir abordar el problema, i va proposar construir un dispositiu que produís un gir constant a partir d'un corrent elèctric. Va buscar la col·laboració de Davy. Malgrat el geni dels dos científics i l'ajuda de Faraday, l'experiment va fracassar i va ser aban-

donat. No obstant això, Faraday hi va seguir treballant. Es va submergir en aquest camp amb la intenció de fer-se un nom mitjançant un descobriment important.

Els primers experiments sobre electricitat efectuats per Faraday van portar a aconseguir la rotació d'un conductor pel qual passa corrent al voltant d'un imant, i, recíprocament, la rotació d'un imant al voltant d'un conductor fix. Uns mesos més tard el jove Faraday havia aconseguit un prototip del que constitueix el «primer motor elèctric de la història». Un motor homopolar, és a dir, en què la polaritat no canvia. Era una pila unida a dos elèctrodes submergits en mercuri, i un cable penjant sobre un d'aquests que estava imantat. El cable donava voltes al voltant de l'imant submergit mentre es mantenia el corrent encès: transformació d'energia elèctrica en energia cinètica de manera directa.

Va ser el gran èxit de Faraday fins aquell moment, però també la seva tragèdia més gran. Encara que la idea no era la de Wollaston, que havia intentat fer girar el cable sobre el seu eix, no al voltant de l'imant, Faraday era conscient que mai no hagués començat a experimentar en això sense la idea de Wollaston. Es va afanyar a escriure l'article i va anar a casa de Wollaston per preguntar-li si podia incloure els experiments realitzats per l'altre. Però Wollaston, com Davy, estava de viatge. Faraday no va tenir paciència, es va anticipar, no va esperar que tornessin de viatge, i va publicar un article en el qual resumia l'evidència experimental i les especulacions teòriques, sense esmentar els experiments previs de Wollaston, perquè no es va atrevir a fer-ho sense el seu permís.

El fet va ser àmpliament criticat a la comunitat científica, món en el qual el mèrit és importantíssim i l'ego alt. El món científic va suposar que Faraday s'havia apropiat de la idea de Wollaston en els seus

experiments, sense voler reconèixer-ho. Faraday es va veure obligat a la desagradable tasca de convèncer-los que havia desenvolupat les seves idees i experiències de manera totalment independent. Quan van sorgir els rumors, Faraday es va afanyar a escriure a Wollaston i després de diverses entrevistes, Wollaston li va treure importància, el problema va quedar aclarit i sense cap ressentiment, va felicitar Faraday pel seu descobriment. Però, irònicament, qui no va canviar d'opinió va ser Davy, que el 1823 va insistir en la calúmnia. Aquest any, sent Davy president i Wollaston vicepresident, Faraday va ser proposat com a *fellow* de ple dret de la Royal Society; tot i que Wollaston li va mostrar el seu suport, Davy s'hi va oposar enèrgicament, i fins i tot va demanar a Faraday que retirés la seva candidatura. Faraday va argumentar que ell no s'havia proposat i que per tant no podia fer-ho. Davy va replicar que ho fessin els que l'havien proposat, a la qual cosa Faraday es va negar, i va respondre a Davy que, ja que era ell el president de la Royal Society, fes el que considerés millor per a la Society, si el cas era que Faraday no mereixia aquest honor. Tot i l'oposició de Davy, Faraday va ser admès a la Royal Society.

Encara que resulti sorprenent, Davy, el 1825, va proposar Faraday com a director del Laboratori de Química de la Royal Society, amb un sou de 100 lliures a l'any, sota la seva supervisió. Mentre era l'ajudant de Davy, Faraday estava eclipsat pel famós científic. Tot és confús, potser Davy sentia una certa gelosia de Faraday: aquest li passava els treballs que enviava a publicar a la *Philosophical Transactions* de la Royal Society, i Davy hi va anar captant l'auge de Faraday. Davy modificava els articles perquè la seva gramàtica era millor, però Faraday sentia cert rancor perquè Sir Humphry s'atribuïa idees que donaven més mèrit del corresponent al seu mentor. De les cartes entre tots dos al llarg dels anys es desprèn que entre ells existia una relació

estranya; d'una banda, cert ressentiment o allunyament a partir del succés de l'article de 1821, però a la vegada un afecte que es va mantenir tota la vida.

Durant aquests anys, Faraday va assentar els seus coneixements i va treballar moltíssim ajudant els conferenciants a preparar les seves demostracions, fent classes als estudiants de medicina, i a més va fer les seves investigacions. Com a ajudant de Davy va aprendre les nombroses tècniques necessàries per a un químic experimental: bufat de vidre, construcció d'aparells, pes exacte de mostres i valoració, entre moltes altres tècniques que va conservar al llarg de tota la seva carrera. Va incrementar també el nombre de tècniques que es podien emprar quan es va interessar en àrees noves de la ciència, i va dissenyar nous dispositius, sovint d'una simplicitat impressionant, per interrogar la naturalesa. Publicava articles sobre el que descobria i s'anava guanyant reputació.

En aquest període, Faraday va emprendre la tasca d'analitzar químicament mostres d'aigua obtingudes en diferents regions de la Gran Bretanya, i a més va ajudar Davy en les seves investigacions, entre les quals destaca la invenció d'una làmpada de seguretat per als miners. El primer treball original de Faraday en química va incloure l'anàlisi de calç viva de la Toscana i el descobriment de clorurs de carboni. Un dels seus descobriments químics més importants es va produir el 1823, quan va idear mètodes per liquar gasos com l'anhidrid carbònic, l'àcid sulfhídric o el clor, sotmetent-los a pressió elevada. També va ser Faraday el primer científic que va aconseguir temperatures sota zero en l'escala Fahrenheit, per la qual cosa se'l pot considerar un avançat de la criogènia.

La indústria del gas de Londres, la Portable Gas Company, venia gas que es produïa escalfant oli de balena o de bacallà en un forn. El

gas que s'utilitzava per a la il·luminació urbana s'emmagatzemava en contenidors d'alta pressió (a unes trenta vegades la pressió atmosfèrica) i es transportava fins al domicili del client. La companyia va observar que durant l'embotellament es recollia un líquid en l'aparell. El 1825 es va demanar a Faraday que analitzés aquest líquid, i va trobar que es tractava d'una barreja de substàncies que s'evaporaven a diferents temperatures. La major part de la barreja era un líquid incolor, amb una olor que recordava les ametlles amb un punt d'ebullició de 186 °F (86 °C), i es tractava d'un compost senzill. L'anàlisi química va revelar que estava compost de carboni i d'hidrogen i permeté establir la proporció dels elements. Faraday el va anomenar *carbur d'hidrogen*. Més tard, el 1834, el químic alemany Eilhard Mitscherlich, que va estudiar les propietats d'aquesta substància, el va anomenar *benzè*.

Un altre aspecte fonamental pel qual Faraday es va fer famós va ser per la seva capacitat de divulgació, en una època en què això era raríssim. A principis de 1826, alliberat de les tasques com a ajudant, Faraday va impulsar l'ampliació del programa de la Royal Institution, objectiu vital, atès que en aquell moment la institució estava en declivi. Faraday va institucionalitzar una xerrada anual per Nadal, en la qual un científic de la institució parlés sobre un assumpte interessant per al públic en general. No era una reunió de científics, sinó una xerrada divulgativa a la qual podia anar qualsevol persona sense formació, especialment joves. Faraday mai no va oblidar els seus orígens, i sempre va tenir gran interès a fer accessible el món de la ciència als més joves. Ell mateix va impartir dinou xerrades. Segons Jane Pollack, del *St. Paul's Magazine*, la gent sortia de les seves xerrades embadalida. Faraday tenia una eloqüència irresistible que acaparava l'atenció. El seu entusiasme es transmetia i el compartia amb l'audi-

tori, mentre revelava els aspectes de la conferència. La gent es barallava per assistir a les seves xerrades. Tot i que la seva educació formal mai no va aconseguir la talla dels seus col·legues, va ser un dels científics més reconeguts. Faraday considerava essencial l'educació científica i sabia que calia captivar a qui l'escoltava, qüestionar les seves idees preconcebudes, sorprendre'l i mantenir el seu interès de principi a fi. La Royal Institution era un organisme que es mantenia amb els ingressos recaptats per l'assistència als cursos impartits i aquestes conferències van ajudar a augmentar la projecció i el prestigi tant de Faraday com de la Royal Institution i van atreure tant nous membres com mecenes, per tant, van assegurar la continuïtat de la institució.

Fruit de les seves investigacions en química va ser el seu llibre *Chemical Manipulation*, publicat el 1827, manual sobre procediments químics dirigit a estudiants sense coneixements previs de la matèria. En lloc de descriure les propietats dels elements químics i els seus



FIGURA 4. Michael Faraday impartint una conferència de Nadal a la Royal Institution, el 1856. Pintura d'Alexander Blaikley.

compostos, Faraday explica com experimentar-hi. Al llarg del text apareixen els procediments, les tècniques i els mètodes químics apresos durant la seva formació a la Royal Institution.

La química era la punta de llança de la investigació científica a Anglaterra. Per a Davy i Faraday, així com per a la majoria dels químics britànics, l'experiment era essencial per a la pràctica de la ciència. La teoria no havia de convertir-se en un dogma, sinó sotmetre's a la prova rigorosa de l'experiment i, si fracassava, modificar-la o abandonar-la. Aquesta actitud experimental va ser la que Faraday va desenvolupar durant la seva formació com a químic, i la que després va traslladar als seus estudis de l'electricitat i el magnetisme.

Quan Faraday era jove, l'electricitat es considerava com una part de la química, a causa fonamentalment que la pila que havia inventat Alessandro Volta el 1800 produïa electricitat per mitjans químics. Faraday va prosseguir els seus estudis sobre electricitat utilitzant els mètodes adquirits quan era un aprenent de químic, i tota la seva vida es va mantenir interessat en temes situats a l'avantguarda de la investigació química. Comparada amb d'altres ciències, la química s'adaptava perfectament a la inclinació i les habilitats de Faraday. A diferència de la física, no era matemàtica, contenia teories que anaven més enllà de la recopilació de dades (que és el que succeïa en la història natural) i implicava experimentació activa amb els fenòmens naturals.

Com a president de la Royal Society i superior de Faraday a la Royal Institution, Davy posseïa poder suficient per exercir una influència considerable sobre el treball i la carrera de Faraday. Va passar del benvolent mentor a explotar les seves habilitats en diversos projectes, sense que el preocupés, almenys aparentment, que aquestes comeses fossin en detriment de la carrera del deixeble. Per exemple,

Davy va disposar que Faraday emprengués una investigació sobre el perfeccionament de la qualitat del vidre per a telescopis i altres instruments òptics, un treball que va durar entre 1825 i 1829 i que va ocupar el seu temps gairebé per complet durant 1827 i 1828. Només un cop mort Davy va poder abandonar aquesta tasca i tornar a preocupar-se de les seves investigacions. L'únic benefici que va obtenir Faraday d'aquest treball va ser que el seu ajudant al laboratori, el sergent d'artilleria Charles Anderson, aconseguís un lloc permanent en la Society.

Després de la mort de Davy el 1829, Faraday es va sentir alliberat i bastant més satisfet amb el seu treball. Tot va canviar. Faraday tenia llavors trenta-vuit anys; no era gran, però superava l'edat en què la major part dels genis creen la seva obra magna. L'alumne va començar a demostrar la seva autèntica talla, ja que durant molt de temps havia estat un científic prometedor però sempre sota la tutela del seu mentor: una part molt petita del seu treball estava associada només al seu nom. Com que Davy era fonamentalment químic, gairebé tot el seu treball s'havia dedicat a la química. Sense Davy, Faraday va començar a realitzar alguns dels experiments que havia estat pensant sobre electricitat i magnetisme.

L'agost de 1831, d'acord amb les notes del diari de Faraday, va realitzar l'experiment que va constituir el seu gran descobriment. Faraday va connectar una pila a 22 m de fil de coure enrotllat en una bobina. En encendre el circuit, el fil conduïa el corrent elèctric i la bobina de coure es convertia en un imant. En segon lloc, va preparar un altre circuit similar, enrotllant 18 m de fil de coure en una altra bobina, però aquesta, més gran i amb una diferència fonamental, el segon circuit no tenia pila i el va connectar a un galvanòmetre. En no estar connectat el segon circuit a pila, el galvanòmetre no regis-

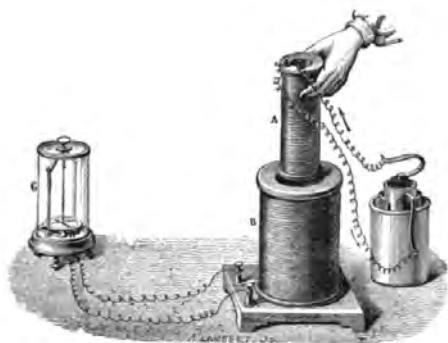


FIGURA 5. Experiment d'inducció de Michael Faraday.

trava corrent. Però quan va encendre el circuit de la pila, en la segona bobina es va enregistrar, durant un instant, un corrent elèctric que desapareixia, tot i que la pila continués connectada. Igual de curiós va resultar que, en apagar el circuit primari, també apareixia en el segon, durant un moment, un corrent. A aquest corrent se l'anomena *corrent induït* i apareix quan hi ha un canvi de corrent.

Però en un segon experiment Faraday va descobrir una cosa més important en la pràctica. Faraday va encendre el circuit de la pila i, amb aquest encès, va observar que si movia la bobina petita respecte a la gran, ficant-la i traient-la de la gran sense tocar-la, en el segon circuit apareixia un corrent elèctric. El corrent era més gran com més ràpid movia la bobina, de manera que si ho feia amb prou rapidesa, el corrent en la segona era superior al produït per la pila en el primari. Això que hauria pogut qualificar-se de màgic, Faraday ho va interpretar d'una manera concisa: l'energia extra en el segon circuit provenia del propi moviment de la bobina petita. Faraday havia fabricat un dispositiu capaç de transformar energia mecànica en

elèctrica. Era un descobriment que canviaria la forma de vida a la terra al llarg del segle xx, i havia estat com a resultat de la seva curiositat.

Faraday, a la pregunta sobre la utilitat dels seus descobriments, tenia el costum de respondre: «Esforça't per donar-los ús». Per exemple, per al cas concret de l'electricitat induïda, sembla que el secretari d'estat del Tresor del Regne, William Ewart Gladstone, li va preguntar sobre el valor pràctic d'aquest resultat, per al qual fins aquell moment no s'havia trobat cap ús determinat; Faraday va respondre que no en tenia la menor idea, però que hi havia grans possibilitats que es pogués, tard o d'hora, aplicar-hi un impost, cosa que el va deixar molt satisfet. I això és exactament el que es fa avui dia, gravant l'energia obtinguda a les centrals hidroelèctriques, en les quals es converteix l'energia cinètica de l'aigua en energia elèctrica, utilitzant unes bobines que roten al voltant d'un eix quan l'aigua empeny les pales de la turbina.

En la mateixa època es feien treballs semblants. Faraday potser no va ser el primer a aconseguir-ho, però sí que va ser el primer a incorporar-los en una sèrie ordenada d'experiments coherents amb explicacions detallades. El 1829, un sacerdot i científic italià, Francesco Zantedeschi, va observar també l'aparició d'un corrent elèctric en moure un imant prop d'un circuit circular, però en aquell temps, com que no es prestava atenció als articles publicats en italià, el descobriment va passar inadvertit. Igualment, el nord-americà Joseph Henry va realitzar experiments similars, però va trigar més temps a decidir-ne la publicació, motiu pel qual els seus treballs són posteriors als de Faraday.

El geni de Faraday era evident, extraient conclusions, per senzill que fos l'experiment. Usant el gran imant de ferradura de la Royal

Society, Faraday es va disposar a demostrar que estava produint el corrent induït en el segon circuit. Va realitzar múltiples experiments amb les bobines en diferent orientació, cables de diversa geometria i en diferent posició, utilitzant un material que va resultar clau: llimadures de ferro. Era ben sabut que, en empolverar-les al voltant d'un imant, s'orientaven en determinades direccions, i ho feien al voltant d'un cable si per aquest circulava corrent, i fins i tot es movien quan es movia la bobina del circuit primari o quan s'encenia o s'apagava el circuit. Faraday, a les línies que dibuixaven les llimadures les va denominar *línies de força magnètiques*, i va intuir que mostraven la geometria i la intensitat del magnetisme generat pel corrent elèctric. En la seva exposició davant la Royal Society el 1831, Faraday diu: «per corbes magnètiques em refereixo a les línies de força que tracen les llimadures de ferro».

Així mateix va observar que el que determinava que en el circuit secundari aparegués un corrent induït era el «canvi en el nombre de línies de força magnètiques que tallava la superfície tancada pel circuit». Era igual el que produís aquest canvi en el nombre de línies que travessaven el circuit: encendre, apagar, allunyar... o fer-lo girar.

El 1832 Faraday va demostrar davant la Royal Society com era possible induir un corrent elèctric mitjançant la rotació d'un electroimant davant d'un circuit estacionari. La Royal Society es va rendir als seus peus, encara que Faraday, als quaranta-un anys, no havia fet més que començar.

No deixa de ser curiós que el mateix mes i any (el novembre de 1831) en què Faraday va proposar les seves línies de força magnètiques, naixés el gran matemàtic i físic escocès James Clerk Maxwell (1831-1879) i que just fins que Maxwell, el 1856, va publicar un

treball titulat «Sobre les línies de força de Faraday», en el qual emprava el llenguatge matemàtic que requerien els descobriments de Faraday, no va ser definitiva l'acceptació de les línies de camp de Faraday. Encara que es va haver d'esperar un temps que Maxwell donés la forma matemàtica completa a les especulacions de Faraday respecte a les línies de força magnètiques. Maxwell, entre 1864 i 1873, va aconseguir unes quantes equacions que, d'una manera concisa i simple, expressaven tots els fenòmens variats d'electricitat i de magnetisme i els va unir per sempre. Una de les seves equacions rep el nom de *lleï de Faraday*. La seva teoria demostrava que l'electricitat i el magnetisme no poden existir de manera independent, per això ens referim a la seva teoria amb el nom de *electromagnetisme*.

Faraday mai no va deixar de fer experiments químics, va simultaniejar els seus experiments en electromagnetisme amb els de química. El 1833, sent ja un investigador reconegut, es va crear per a ell una nova càtedra a la Royal Institution, la càtedra fullerana de química, que va mantenir fins a la seva mort. El nom de la càtedra es deu a qui la va crear i va finançar, John Fuller.

El 1800 Volta havia comunicat a la Royal Society la invenció de la seva pila elèctrica. Volta havia demostrat que, posant dos metalls en una solució àcida, es desenvolupava un corrent elèctric. William Nicholson i Anthony Carlisle, dos químics anglesos, després de conèixer el descobriment del químic italià, van construir la seva pròpia pila, la primera fabricada a Anglaterra. Així mateix, van pensar que si d'una reacció química, la dels àcids sobre els metalls, s'obtenia corrent elèctric, seria igualment possible provocar una reacció química fent passar electricitat a través d'una solució. Van posar aigua en un recipient, hi van submergir dos cables i els van connectar a una pila. Tot just s'establia el contacte dels dos elèctrodes immersos en el lí-



FIGURA 6. Michael Faraday al seu laboratori. Pintura de Harriet Jane Moore.

quid, van començar a formar-se bombolles de gas que van sortir a la superfície: era la dissociació de l'aigua per via elèctrica. Nicholson i Carlisle havien electrolitzat l'aigua, i l'havien descompost en els seus components elementals, hidrogen i oxigen; així invertien el cèlebre experiment realitzat per Henry Cavendish (1731-1810), en què el científic havia mostrat a la seva audiència de la Royal Society com obtenir aigua fent esclatar una espurna en un recipient que contenia hidrogen i oxigen. Si es disposaven els recipients adequats sobre els dos elèctrodes, es podien recollir els dos gasos per separat, a mesura que s'anaven formant. Llavors es va observar que el volum de l'hidrogen produït per electròlisi era exactament el doble que el d'oxigen, i això va fer veure que a l'aigua hi havia més espècies d'hidrogen que d'oxigen: almenys el doble. En altres paraules, que cada partícula d'aigua estava formada per almenys tres àtoms i no per dos, com havia proposat Dalton. No obstant això, Nicholson i Carlisle no van extreure les conclusions teòriques del seu experiment bàsic. Els fenòmens de l'electròlisi van ser interpretats correctament per Sir Humphry Davy,

mentre que el químic francès Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) va concloure el treball de la composició de l'aigua.

Amb aquests antecedents, entre 1833 i 1834 Faraday va abordar la recerca de la relació entre l'electricitat i la matèria. En aquest camp d'investigació, en el qual apareixen estretament unides les dues passions de les seves lectures de joventut, la química i l'electricitat, es va embarcar en un detallat i sistemàtic estudi dels fenòmens electroquímics, i va experimentar amb diverses propietats del corrent i dels reactius.

Durant la primera meitat del segle XIX, la química va ser un camp d'investigació molt important a causa, sobretot, de les múltiples aplicacions comercials que tenia. No és estrany, per tant, que Faraday enfoqués l'estudi de la matèria a través de l'electricitat, i el d'aquestes dues, al seu torn, mitjançant procediments químics. Atès que l'electricitat estava íntimament involucrada en el canvi químic, l'estudi dels fenòmens electroquímics constituïa una manera apropiada d'avançar simultàniament en dos fronts.

Va haver de resoldre problemes relacionats amb el disseny d'instruments especials per a la mesura i l'aïllament dels productes de la descomposició, fins a l'estudi dels efectes secundaris que interferien amb la mesura correcta d'aquests productes. Entre aquests va dissenyar un aparell, que va anomenar *voltàmetre*, que mesurava l'electricitat d'una pila de Volta. Faraday va investigar per trobar una relació quantitativa entre l'electricitat i el canvi químic.

L'any 1834, Faraday va publicar un article en el qual descrivia la quantitat de substància que es dipositava en una cel·la electrolítica. Les conclusions d'aquell article reben avui en dia el nom de *lleis de Faraday* i en el seu honor la quantitat d'electricitat necessària per alliberar un equivalent d'una substància s'anomena *faraday*. Les lleis

de l'electròlisi van establir les bases d'una nova branca de la química, l'electroquímica.

Continuava sense tenir cap idea clara de com interaccionaven l'electricitat i la matèria. Després d'observar que en congelar-se un líquid deixava de conduir l'electricitat, fet que l'havia impressionat, va proposar que tots els cossos conduïen l'electricitat de la mateixa manera, des dels metalls fins a la laca i els gasos, però en graus molt diferents. Amb aquest suggeriment contradeïa un dels supòsits de l'electrostàtica més estimats i arrelats, que les substàncies materials es dividien en dues classes: conductors i aïllants. Però el seu argument implicava introduir les forces moleculars que s'activaven en els canvis d'estat. No va poder aconseguir-ho, i va abandonar les teories atomístiques a la primavera de 1834, sense saber que havia posat els pilars de la teoria electrònica i de la dissociació iònica, que es van desenvolupar cinquanta anys després.

Un dels resultats secundaris que va tenir més rellevància va ser el relacionat amb l'efecte del platí, metall que usava com un dels pols de la cubeta. Faraday va descobrir que fins i tot el platí més pur induïa canvis químics en la seva superfície quan no passava el corrent, i que altres metalls podien actuar de la mateixa manera, si eren prou purs. El seu estudi de l'acció catalítica (anomenada així, el 1836, per Jöns Jacob Berzelius) va ser una de les ocasions en què els seus experiments evidenciaven nous processos, encara que no va aconseguir-ne la interpretació.

No obstant això, el seu èxit perdurable va ser l'establiment del vocabulari de l'electroquímica. La majoria dels termes que s'utilitzen avui són de la seva factoria. Aquests termes es van crear després d'una anàlisi dels processos. En els pols metàl·lics d'una cubeta es precipiten o es desprenen productes químics en estat gasós. Se'ls

anomenava *pols* perquè molts creien que atreien o repel·lien les partícules dels reactius: els pols en els quals apareixien hidrogen i oxigen quan es descomponia l'aigua es denominaven el *pol de l'hidrogen* i el *pol de l'oxigen*, respectivament. Faraday considerava els pols com a portes per on el corrent podia entrar o sortir de la solució per completar el circuit. El corrent feia possible el canvi químic, permetia que es relaxessin les tensions entre les partícules: era un «eix» de poder al llarg del qual es movien tensions i descàrregues.

Faraday va buscar noves paraules per evitar utilitzar paraules conegudes que poguessin desvirtuar les noves explicacions dels fenòmens ja coneguts. Havia de reescriure els fenòmens electroquímics. Faraday buscava noves denominacions per a fenòmens que no eren nous, ja que considerava que les paraules familiars i arrelades podien condicionar la nostra manera d'interpretar els fenòmens observats. Pretenia dir alguna cosa nova sobre fenòmens familiars, i els volia alliberar de la manera que fins aquell moment havien estat interpretats. Encara que llavors no tenia clara la interpretació, considerava que les idees dominants de l'època sobre l'electricitat tenien els dies comptats, per això buscava noms amb què referir-se a les coses sense involucrar cap teoria de la naturalesa de l'electricitat. Faraday va crear espai per a una teoria nova, tot i que encara no podia determinar-ne els continguts.

La proposta de Faraday per al nou llenguatge la va fer amb l'ajuda de William Whewell, del Trinity College de Cambridge, científic i expert en llengües clàssiques. Faraday va descriure les entitats i situacions que havien d'explicar les noves paraules i Whewell va suggerir vocables derivats d'arrels gregues. Per al corrent que es movia en sentit est-oest, Whewell va suggerir les paraules *eisodo* i *èxode* (que signifiquen, respectivament, 'camí d'entrada' i 'camí de sortida') i

ànode i *càtode* (que signifiquen ‘camí de l’est’ i ‘camí de l’oest’). Com ja sabem, Faraday va adoptar aquests dos últims termes per designar els antics «pols».

A la ruptura de molècules pel corrent elèctric la va anomenar *electròlisi*; *electròlit* a la solució a través de la qual circulava el corrent, i *elèctrodes* a les varetes metàl·liques a les quals connectava el circuit amb la dissolució. A les espècies en moviment a través de la dissolució les va anomenar *ions* (que significa ‘viatgers’ en grec); als ions que van a l’*ànode* els va anomenar *anions*, i als que es dirigeixen al *càtode*, *cations*.

Les lleis de l’electròlisi s’interpreten fàcilment d’acord amb l’estructura atòmica, però ell mai no va ser un entusiasta de la teoria atòmica, i va ignorar tant com va poder el concepte de *àtom*. Restava un temps perquè sorgís el primer model atòmic amb certa consistència (Joseph John Thomson, 1898). D’acord amb la teoria que va introduir Faraday, els pesos equivalents dels cossos són simplement les quantitats d’aquests que s’alliberen o es desprenen amb quantitats iguals d’electricitat.

El físic alemany Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) va defensar que la teoria electroquímica de Faraday implicava l’existència de l’electró o «àtom d’electricitat», existència que Faraday sempre es va resistir a admetre. El 1858 Stanislao Cannizzaro va recuperar la teoria d’Amedeo Avogadro, amb la qual va demostrar que l’existència de molècules i àtoms que havia establert permetria explicar algunes contradiccions aparents que s’havien detectat en el pes equivalent.

L’accepció que Faraday donava a la paraula *ió*, identificada com a substància que circula a través d’un electròlit, és una prova més de la seva aversió a la concepció corpuscular. Tanmateix, aquesta aversió

a les teories corpusculars el va ajudar a aconseguir les seves concepcions sobre camps.

La ingent tasca investigadora en el camp de l'electroquímica va tenir una aplicació quasi immediata, el galvanitzat, desenvolupat comercialment a Anglaterra des de 1840.

Els anys següents, fins a 1840, Faraday va examinar amb multitud d'experiments tot allò relacionat amb l'electricitat. En aquest moment, encara no estava clar si existia un únic tipus d'electricitat o uns quants. Va tractar de determinar què tenien en comú els diferents tipus d'electricitat que es consideraven: electricitat animal, electricitat química, electricitat fotovoltàica, triboelectricitat, la qual s'aconseguia per xoc o fregament, etc., i va intentar determinar si era possible convertir una electricitat en una altra. La seva conclusió va ser que, independentment de l'origen, la càrrega elèctrica era una sola, i el seu moviment, el corrent elèctric. Va proposar que les diferències es trobaven en la magnitud de la càrrega o el seu moviment (la intensitat) i en l'ímpetu d'aquest moviment (el voltatge). L'electricitat era una. Faraday, com en altres ocasions, havia exercit d'unificador de conceptes: havia tancat el cercle, obert per Ørsted, entre electricitat i magnetisme, d'una banda, i havia desterrat les diferències entre les electricitats, d'una altra. Tenia uns cinquanta anys.

Faraday s'anava allunyant de les formes tradicionals de teoritzar sobre l'electricitat i la matèria. Es va plantejar que tot necessitava un nou enfocament per incloure fenòmens com la pila de Volta o els fenòmens electroquímics i electromagnètics. El 1837 i 1838 va publicar un vigorós desafiament experimental a l'electrostàtica clàssica.

El que realment obsessionava Faraday i el que probablement va

ser la seva aportació més gran a la física van ser les línies de força i la idea que la càrrega i el corrent elèctric, així com els imants, podien actuar a distància mitjançant aquestes línies invisibles, que es feien visibles en posar-hi llimadures de ferro. Al voltant de 1838 va realitzar el segon gran experiment de la seva vida: el de la glaçonera, també anomenat «de la gelera», un experiment que va repetir en públic el 1843. Faraday va utilitzar una glaçonera de gel gran i metàl·lica col·locada sobre un suport de fusta per aïllar-la del sòl i una boleta metàl·lica que descendia o s'elevava dins de la glaçonera de gel mitjançant un fil. Per mesurar la càrrega elèctrica, Faraday va utilitzar un electroscopi, que consisteix en un parell de làmines metàl·liques unides mitjançant un cable i introduïdes en un pot de vidre. Quan les làmines es carreguen elèctricament, es repel·leixen, i la seva separació és més gran com més gran és la càrrega elèctrica de l'objecte al qual es connecta amb el cable. Inicialment la glaçonera no té càrrega elèctrica, i en estar sobre el suport de fusta es troba connectada a terra. La boleta la va connectar a un objecte amb càrrega positiva. Amb l'electroscopi connectat a l'exterior de la glaçonera, Faraday va fer baixar la boleta a l'interior de la glaçonera sense tocar-ne la superfície. L'electroscopi marcava una càrrega més i més gran com més entrava la boleta en el cub, de manera que quan va estar completament a dins, la part exterior de la glaçonera tenia exactament la mateixa càrrega que la boleta, i aquest valor es mantenia encara que es moguéss la bola d'un costat a l'altre. Si la bola es treia, l'electroscopi marcava una càrrega nul·la. La càrrega de la paret exterior de la glaçonera era una càrrega induïda i l'acció era a distància a través de les línies de força elèctriques creades per la càrrega de la boleta. En el seu primer gran experiment Faraday havia mostrat l'existència de línies de força magnètiques generades pel



FIGURA 7. Experiment de la glaçonera de gel de Michael Faraday.

corrent elèctric, que al seu torn induïen altres corrents elèctrics. Ara mostrava que existien línies de força elèctriques que induïen càrrega elèctrica. Existia també una acció a distància.

Faraday va deduir que la paret interior de la glaçonera tenia càrrega negativa, igual en magnitud a la positiva de fora, de manera que la glaçonera seguia sent neutra. Per comprovar-ho va fer que la boleta toqués la paret de la glaçonera. L'electroscopi unit a la paret exterior no va registrar cap canvi, però en treure la boleta i mesurar-ne la càrrega, l'electroscopi va registrar una càrrega nul·la; la càrrega de la boleta s'havia neutralitzat amb la càrrega negativa de l'interior de la glaçonera. Però l'exterior de la glaçonera seguia estant carregat elèctricament amb la mateixa càrrega induïda, que coincidia en valor amb la inicial de la bola. El que passava dins i fora de la glaçonera era completament independent. La glaçonera resultava un «escut» entre fora i dins, aïllava elèctricament els efectes interiors i exteriors.

Es van confirmar els resultats després de la construcció d'una carcassa de fusta recoberta amb fulles de metall, prou gran perquè hi cabessin diverses persones, que va haver de transportar-se des del laboratori, situat al soterrani, fins a la sala de conferències de la Royal Institution, situada al pis de dalt. Allà va viure Faraday enllumenat

amb espelmes durant una temporada. Aquesta gàbia estava aïllada del terra i connectada a una màquina elèctrica de fregament. El sergent Charles Anderson, ajudant de laboratori, va carregar la gàbia perquè en sortissin espurnes. Mentrestant, Faraday, a l'interior, comprovava que fins i tot l'aparell més delicat no podia detectar efectes elèctrics. És a dir, quan un cos es carregava, fos el que fos, això tenia lloc en l'espai entre la superfície del cos i els seus voltants. Aquesta va ser la primera *caixa de Faraday*, dispositiu que ara és molt utilitzat per protegir de les ones de ràdio els instruments de mesura sensibles i que va tenir el seu origen en una qüestió aparentment abstracta sobre la comparació de càrregues positives i negatives.

Faraday va argumentar que la inducció —el poder de causar un estat oposat— és el primer principi de la ciència elèctrica. Va dotar la paraula *càrrega* d'un nou significat, és a dir, 'els efectes manifestos d'un estat de tensió mantingut per la matèria'. A finals de 1836, després de consultar-ho amb Whewell, va anomenar *dielèctric* aquesta matèria. L'acció a través del dielèctric és local, mitjançant partícules contigües. La càrrega apareix en les superfícies que separen bons i mals conductors, interpretació que desafiava la imatge habitual que la càrrega era allò que s'acumulava en la superfície dels conductors. Els dielèctrics són necessaris perquè la càrrega existeixi. Per a Faraday, *inducció* significa 'l'acció que indueix càrregues en la superfície d'un conductor' i es mesura com una densitat superficial. Els seus experiments van arribar a confirmar que la càrrega no existeix en la forma d'un fluid escampat en la superfície dels conductors sinó que resulta de la tensió sostinguda pels aïllants propers, i que les forces elèctriques són «inductives», és a dir, sempre creen efectes oposats, positiu o negatiu. Faraday va demostrar que la disposició dels cossos carregats i el medi que els envolta afecta la distribució de l'electricitat.

Amb ajuda de la seva gàbia, Faraday descobreix experimentalment el principi de les pantalles elèctriques, que havia estat demostrat teòricament; verifica el principi de conservació de l'electricitat, i mesura els «poders d'inducció específics» de diversos cossos aïlladors, que ara anomenen *constant dielèctrica*, concepte que introdueixen en la física.

En aquesta època, de vegades, la salut de Faraday es ressentia de l'excessiu treball. Quan això passava, la seva dona el traslladava a Brighton, lloc de vacances no gaire lluny de Londres. El 1835, unes vacances a Suïssa el van recuperar, però el 1840 Faraday estava exhaust.

La salut de Faraday va patir un col·lapse quan tenia quaranta-nou anys. Va ser llavors quan va fer un viatge pel continent per oblidar-se de la ciència, va passar vuit mesos a Suïssa descansant amb la seva dona i el seu germà Robert. La causa de la seva malaltia no és clara, probablement el desembre de 1839 patís una petita lesió cerebral. S'ha suggerit que les seves pèrdues de memòria foren ocasionades per enverinament amb metalls pesats, plom o mercuri, que utilitzava freqüentment en el laboratori. No obstant això, la seriosa malaltia mental de Faraday no va afectar, un cop recuperat, la seva capacitat de raonament i la seva intuïció. El 1844 s'havia recuperat, encara que a partir d'aquest moment es va seguir queixant de pèrdues de memòria. Des de llavors va reduir gradualment les seves obligacions socials, conferències, classes, etc.

Faraday va reprendre les seves investigacions sobre líquació de gasos, i el 1845, amb cinquanta-quatre anys, va intentar per sisena vegada descobrir la vinculació entre l'electricitat, el magnetisme i la llum. Faraday, com la majoria dels seus contemporanis, creia que cada tipus de força havia de convertir-se en una altra o unes altres.

Des de fa temps he tingut l'opinió [...] que les formes diverses en què s'expressen les forces de la matèria tenen un origen comú, que estan tan directament relacionades, que tenen una dependència mútua tal que són convertibles unes en altres.

El 1823, John Herschel havia intentat afectar la llum amb una espiral electromagnètica. Faraday en aquest temps havia intentat en diferents ocasions, sense èxit, aconseguir que l'electricitat estàtica afectés la llum; esperava que els fenòmens òptics posessin de manifest l'efecte de l'electricitat sobre la matèria. A la reunió de juny de 1845 de la British Association for the Advancement of Science, va conèixer William Thomson, que explorava les analogies entre les descripcions matemàtiques de diferents forces. La relació amb Thomson, que en aquell moment només tenia vint-i-un anys, va animar Faraday a reprendre la recerca d'un efecte elèctric sobre la llum. En no aconseguir resultats, va assajar forces magnètiques en lloc d'electricitat. Faraday proposava dos supòsits: o el magnetisme afectava la llum directament o la llum indicava un efecte sobre la matèria. Per magnificar el possible efecte, necessitava vidre amb un elevat índex de refracció. Va recuperar el vidre que havia fabricat entre 1828 i 1829 per a la Royal Society per encàrrec de Davy, i en va situar un tros entre els pols d'un electroimant molt potent.

El setembre de 1845 Faraday va demostrar la connexió entre llum i electromagnetisme. Va descobrir que un camp magnètic canvia l'orientació del pla en què està polaritzat el raig de llum, efecte que es coneix com a *efecte Faraday* o *efecte magnetoòptic*, i que es produïa només quan els raigs de la llum passaven al llarg de les línies d'inducció magnètica entre els pols. En haver connectat abans electricitat i magnetisme, l'efecte magnètic sobre la llum era prova de la connexió

entre els tres fenòmens. Faraday tenia cinquanta-quatre anys. De fet, Faraday sospitava que les responsables de la llum eren les línies de força: que la llum era una vibració d'aquestes línies de força elèctriques i magnètiques. Com s'ha dit abans, va ser James Clerk Maxwell qui va saber combinar el coneixement de l'època i donar l'explicació matemàtica completa que permetia predir exactament el resultat dels experiments. Un dels aspectes més importants d'aquesta teoria va ser la demostració que la llum és la vibració transversal del medi electromagnètic, que es propaga a la velocitat de $300.000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Per tant, les especulacions de Faraday quedarien fermament arrelades a la teoria matemàtica. Si bé és cert que sense Maxwell les idees de Faraday haurien esperat dècades a ser demostrades, no és menys cert que sense Faraday no hi hauria hagut equacions de Maxwell.

Atenent aquest resultat, Faraday va continuar buscant l'efecte universal del magnetisme, cosa que havia intentat la dècada anterior. El novembre de 1845, després de molts fracassos, va mostrar que una barra de vidre pesat, suspesa delicadament entre els pols d'un electroimant potent, adoptava una posició perpendicular a les línies que unien els pols. El fet era sorprenent, ja que un imant de ferro se situaria al llarg de les línies en ser atret cadascun dels seus pols pel pol oposat de l'electroimant. L'efecte s'havia observat abans, però la investigació s'havia abandonat, ja que no semblava involucrar atracció o repulsió, que és el que s'esperava d'acord amb la teoria newtoniana. Faraday va demostrar que l'efecte era general: barres de fusta, paper, metalls i diferents substàncies se situaven transversalment a les línies de força. Les «noves» propietats magnètiques només es manifestaven si l'imant era molt potent. Faraday va demostrar que aquestes substàncies podien ordenar-se segons la seva sensibilitat al magnetisme. Faraday va anomenar aquestes substàncies *dimagnèti-*

ques, però una consulta amb William Whewell li va fer canviar a *diamagnètic* per analogia amb els dielèctrics. El criteri clau per determinar la identitat magnètica de la substància era la seva orientació equatorial o transversal respecte a les línies de força. Les noves propietats només es detectaven mentre el camp estava actuant. Va descobrir un fet també molt rellevant: els diamagnètics es mouen de manera diferent que els imants ordinaris. Mentre que els imants són atrets als pols, els diamagnètics es mouen allunyant-se dels pols. La llei general de l'acció afirmava que els diamagnètics es mouen cap a regions allunyades dels pols, on el magnetisme és més feble, mentre que els imants es mouen cap a on l'acció magnètica és més intensa. Faraday descriu la conducta dels objectes en termes de camp. Els imants es mouen cap a regions en què l'acció és més intensa perquè la força passa a través seu amb més facilitat. Els diamagnètics s'allunyen de les regions magnètiques perquè condueixen l'acció amb menys eficiència que els imants. En general, els cossos s'haurien de moure de manera que la resistència que oposen al pas de la força es minori, i el moviment natural és el que aconsegueix la màxima economia en el consum. Aquesta simple idea implica una concepció del moviment no newtonià: la conducta de qualsevol cos en un camp magnètic no és conseqüència d'una qualitat intrínseca, com podria ser la massa, sinó que està determinada pel fet que condueix les línies pitjor o millor que la matèria que l'envolta. Va demostrar la seva idea comprovant que un mateix material tenia un comportament diferent depenent del material del seu entorn.

Aquesta explicació concordava amb les idees teològiques de Faraday, però requeria que l'espai buit conduís les línies de força. De nou, això entrava en conflicte amb idees tradicionals sobre la matèria i l'espai. Com que va demostrar que en el buit els diamagnètics i els

magnètics seguien actuant, l'espai havia de transmetre l'acció magnètica, i això exigia una nova teoria de la matèria i l'espai. Aquestes teories les va presentar en conferències a la Royal Institution el 1844 i el 1846. El 1846, va argumentar que l'electricitat i el magnetisme es transmeten a través de l'espai com a vibracions en les línies de força. Els moviments dels cossos sotmesos al camp podien explicar-se fent referència al que ocupava el camp (matèria i línies de força), en lloc d'utilitzar els conceptes de *atracció* i *repulsió* newtonians. La matèria es mou oferint una resistència mínima al pas de la tensió, mentre que les línies de força adopten la disposició que els permet seguir trajectòries de resistència mínima al pas de l'acció inductiva.

Convençut que tots els fenòmens observats en el món físic estan relacionats, Faraday va intentar també establir una relació entre forces electromagnètiques i gravitatòries, però els seus esforços van resultar infructuosos. Aquest objectiu també el va perseguir Einstein un segle després, durant dècades, i tampoc no el va aconseguir.

En els inicis de l'Anglaterra victoriana, els científics van exercir un paper molt important en la vida civil. Quan es va fer famós, Faraday va formar part d'aquest moviment, de manera que sovint l'Almirallat, el Ministeri de l'Interior i comissions reials li sol·licitaven assessorament. Va col·laborar en comitès reials que s'ocupaven de qüestions com l'enllumenat de gas, el manteniment dels ports, l'enllumenat dels fars o la seguretat de les mines. Va treballar per protegir contra la corrosió els cascos dels vaixells, va actuar de perit forense en diversos judicis i va identificar la pols del carbó com a responsable en certes explosions en mines. No obstant això, en una ocasió es va negar a col·laborar amb el Govern. El 1855 el Govern britànic va proposar utilitzar gasos tòxics com a arma en la Guerra de Crimea. Faraday va pensar com podrien fer-se servir, però va respon-

dre que la idea li semblava moralment repugnant i que no hi volia tenir res a veure.

Quan Faraday deia alguna cosa, els anglesos l'escoltaven. Un metge de l'època, John Snow, va demostrar que el còlera estava associat a l'aigua contaminada del Tàmesi. El 1855, Faraday va escriure en el diari *The Times* un article en què denunciava les condicions insalubres del riu Tàmesi, i va responsabilitzar la qualitat de l'aigua de les successives epidèmies que es declaraven a la ciutat. Malgrat el seu interès, en aquesta ocasió les autoritats no van fer gaire cas a Faraday, que apostava per un sistema de clavegueram diferent.

Faraday va tenir també la seva particular lluita amb la pseudociència, en una Anglaterra victoriana que bullia amb bruixes, lectures de mans i espiritisme. Com que era un científic famós, rebia consultes sobre aquests temes, especialment sobre les taules giratòries. El procés consistia a fer seure els assistents al voltant d'una taula amb les mans a sobre i els esperits suposadament responien, movent la taula, a les preguntes que els feien. Per desmuntar l'engany, Faraday va realitzar un experiment consistent a construir una taula sobre la qual va col·locar un segon tauler separat del primer per uns cilindres de vidre. Va demostrar, mitjançant una agulla que marcava els moviments, que eren els mateixos assistents que d'una manera inconscient movien la taula, i que aquells que estaven convençuts de l'espiritisme realitzaven moviments musculars involuntaris que feien girar la taula. No hi havia esperits sinó credulitat. Va publicar el seu experiment en l'*Illustrated London News* i va desmuntar el negoci. Va utilitzar la mateixa manera de fer que per a gairebé tota la resta: experimentació, experimentació i més experimentació.

El 1860, va donar les seves últimes xerrades de Nadal a la Royal Institution. Cal destacar-ne especialment una obra mestra de la divulgació

científica titulada *Història química d'una espelma*: una sèrie de sis sessions al llarg de les quals va mostrar, emprant una espelma i parlant de com crema, conceptes de la física i la química. La sessió s'iniciava amb la flama, la seva estructura, com l'oxigen de l'aire modificava la seva lluentor i com es podia condensar l'aigua present en la flama. A partir de l'aigua parlava de l'oxigen i de l'hidrogen, la combustió, la respiració i la connexió entre l'espelma i la vida. Faraday tenia seixanta-nou anys.

Faraday va seguir treballant, experimentant i obtenint resultats fins a una edat avançada. A principis de la dècada de 1860, com a conseqüència d'un gradual afebliment i de la pèrdua de facultats, Faraday va renunciar a la càtedra de química que tenia des de 1833 i es va retirar del laboratori, circumstància que va entristir els últims anys de la seva vida. Patia un enverinament crònic lleu, similar al que va sofrir el seu mentor Davy. Des de 1858, Faraday vivia en una casa de Hampton Court, una de les de gràcia i favor que li va proporcionar la reina Victòria i el príncep consort, un gran admirador de Faraday, i a la butaca de casa seva va morir el 25 d'agost de 1867, als setanta-sis anys.

Per desig exprés de Faraday, el seu funeral va ser privat i senzill, havia rebutjat l'honor de ser enterrat a l'abadia de Westminster, encara que hi ha una placa en el seu honor, molt a prop de la d'Isaac Newton. Va preferir una làpida senzilla en la part no anglicana del cementiri de Highgate de Londres.

Només hi havia una faceta de la seva vida (que en va ocupar una part important) a la qual no aplicava el seu amor a l'experimentació: la religió. Excepte un breu període el 1844, en què se l'en va excloure, va ser membre de l'església sandemaniana durant tota la seva vida. Va ser diaca de 1832 a 1840 i notable entre els anys 1840 i 1844, i de 1860 a 1864. Atès que només aquells que s'adherien estrictament

als ensenyaments de la Bíblia podien ser elegits notables, el seu nomenament suggereix la categoria i l'elevada posició moral que tenia dins de la congregació.

Faraday, com els altres sandemanians, llegia la Bíblia diàriament i en posseïa un coneixement excel·lent. A més, estava obligat a atendre els pobres i necessitats de la congregació: donava a l'Església una part considerable del que guanyava, i freqüentment visitava i atenia els malalts. Tot això, suposava altes dosis d'humilitat i obediència.

La religió que va abraçar Faraday creia en la veritat literal de la Bíblia, i considerava que el món està sota el domini de Déu i que, a través de la Bíblia i de l'exemple de Crist, es mostra com havien de viure els cristians. En la seva vida quotidiana, havien de viure amb un elevat sentit de l'amor i d'aplicar estrictes principis morals com havien fet les primeres comunitats cristianes. Faraday concebia el món natural amb el qual experimentava com el resultat de la creació de Déu. En la seva concepció del món, Déu havia creat l'Univers, i el Creador havia inclòs lleis i normes que són les que obeeixen els objectes físics. Afirmava que el llibre de la natura que hem de llegir ha estat escrit pel dit de Déu. El llibre era intel·ligible, però Déu no, de manera que Faraday va consagrar la seva vida a la determinació de les lleis, utilitzant unes eines per relacionar-se amb el món físic —la ciència i la raó— i unes altres per relacionar-se amb Déu —la fe. La secta sandemaniana es va extingir a finals del segle XIX.

Faraday, dit *l'Unificador*, va mantenir tota la vida una separació molt estricta entre ciència i religió. Gairebé sempre es planteja que ciència i religió són bàsicament incompatibles: l'anomenada «tesi del conflicte», ja que la ciència està basada en la raó, mentre que la religió s'inclina davant una autoritat no racional. Faraday, però, tenia una organització molt singular de la seva ment, no veia cap antago-

nisme entre la seva ciència i la seva religió, almenys aparentment, i rebutjava que ciència i religió poguessin xocar. La seva idea era la següent: els fets són la veritat, els fets poden ser observats o revelats segons siguin científics o religiosos. Al seu voltant es construeix ciència en un cas, i teologia en l'altre.

En aquest sentit, John Tyndall, el seu amic i biògraf, amb la seva habitual mordacitat, deia que «quan Faraday obria la porta de l'oratori, tancava la del laboratori». Faraday sostenia que la seva ciència i la seva religió estaven completament separades i no interaccionaven. Va saber establir una barrera infranquejable entre aquests dos compartiments, els quals, encara que independents, en alguns moments entraven en comunicació. Hi ha molts exemples d'intuïcions religioses utilitzades com a font d'inspiració en els seus escrits científics.

La peculiar estructura mental de Faraday li va permetre contemplar la ciència i la religió com dues realitats autònomes. La seva pertinença a una secta tan tancada i estricta va influir en l'adopció d'algunes actituds vitals. Un dels principis de la secta, no fer proselitisme, va originar o va accentuar la seva incapacitat per crear una escola d'investigació científica. Faraday sostenia que mai no havia escrit cartes de recomanació per a ningú, per més que el conegués. Sembla que el disgust que li produïa l'ambient competitiu impedia que recomanés científics per a diferents càrrecs. No obstant això, estava disposat a respondre dels seus companys sandemanians i dels membres honrats d'aquestes famílies. Faraday va propiciar que diversos sandemanians aconseguissin llocs de treball a la Royal Institution.

Els autors contemporanis de Faraday coincideixen a descriure'l com un ésser extraordinari, dotat d'una personalitat enormement atractiva. Tyndall assenyala que Faraday era veritablement afectuós,

cortès i equànime, però que sota la seva dolçor i elegància amagava la còlera d'un volcà i que gràcies a la seva autodisciplina convertia el foc interior en força vital. El fet que un científic de primera fila posseís una personalitat tan atractiva va donar lloc a una imatge pública altament favorable.

Un altre aspecte rellevant de la personalitat de Faraday, íntimament relacionat amb la seva vida i la seva obra, és la importància que concedia a l'ordre. Déu havia creat l'Univers segons lleis inalterables, i el científic tenia el deure de crear un mitjà ordenat que comprengué aquestes lleis. Faraday es va sentir atret per la ciència en gran part perquè, a diferència de la política, aquella constituïa un àmbit en què regnaven la pau i l'ordre. La seva preocupació per l'ordre apareix amb nitidesa en els set volums del seu diari, les seves notes d'investigació, en el qual figuraven numerats els paràgrafs de l'1 al 16041.

D'altra banda, la seva condició de sandemanià el va fer renunciar a tota classe de vanitats i honors. Quan veia que el seu mentor Davy, el qual també procedia d'un medi humil, gaudia dels avantatges socials i econòmics proporcionats per l'èxit de la ciència, i anava descuidant paulatinament la seva investigació científica, ho percebia com a corrupció. Faraday manifestava la seva aversió al poder, el mecenatge i la política. Creia que el descobriment científic era una font de veritat i progrés de la màxima importància per a la humanitat, mentre que la política era regressiva i efímera. No va acceptar honors de la Gran Bretanya, ja que va considerar que aquests es concedien per serveis polítics i no per èxits professionals. Així, va rebutjar l'oferta del càrrec científic més important del país, la presidència de la Royal Society, que Davy havia ocupat, i va passar el mateix quan li van proposar ser nomenat cavaller. No obstant això, va ac-

ceptar els honors de França i Rússia perquè considerava que en aquells països aquestes distincions sí que es concedien per mèrits.

La profunda religiositat de Faraday com a sandemanià era comparable al fort sentit del deure cap a la Royal Institution, a la qual se sentia molt agraït per proporcionar-li una via d'entrada a la ciència i l'ajuda que va necessitar. Per això considerava una qüestió de deure i gratitud fer el que pogués per a aquesta institució. La Royal Institution li proporcionava on investigar, tenia les millors instal·lacions que hi havia a la Gran Bretanya, era on impartia les seves conferències i era també la seva llar, on vivia amb la seva dona. Després dels problemes de salut de 1840 Faraday va abandonar l'organització personal de les conferències, encara que continuava convencent els seus amics per impartir-les. Entre els conferenciantes de la Royal Institution al llarg del segle XIX figuren l'autor de la taula periòdica, Dmitri Mendeléiev (1834-1907); Jean Dumas (1800-1884), amic personal de Faraday i que va arribar a ser ministre d'Agricultura i Educació francès, i Stanislao Cannizzaro (1826-1910), químic italià que va ressuscitar la hipòtesi d'Amedeo Avogadro.

Es parla de Faraday com el típic científic solitari que treballa sense parar en el seu laboratori del soterrani, i que només quan fa un descobriment l'anuncia al seu auditori de la sala de conferències. Aquesta imatge es veu refermada pel fet que hi ha escasses referències de col·laboració amb altres científics en el seu diari. És cert que en les seves investigacions sobre l'electricitat i el magnetisme gairebé sempre va treballar sol. Però de les seves notes es dedueix que no va passar tot el temps tancat al laboratori. La major part del seu treball de recerca es va dur a terme en els mesos d'estiu anteriors al començament de la temporada social a Londres, que era la que marcava el calendari de la Royal Institution. El seu temps durant la temporada estava ocupat

amb les obligacions en les diferents institucions amb què col·laborava: la Royal Institution, la Royal Society, la Royal Society de Londres, l'Ateneu, la Society of Arts...

Al llarg de tota la seva vida es va interessar vivament pels processos tècnics i el disseny de màquines. El 1819 es va unir a la Society of Arts, en la qual en els anys següents van ingressar diversos membres de la City Philosophical Society, després que aquesta es dissolgués. Encara que va ser membre d'aquesta societat tota la seva vida, el seu període de més activitat va coincidir amb la dècada de 1820 i de 1830, quan en va presidir el Comitè de Química. La tasca que desenvolupava en aquest càrrec va ser jutjar els mèrits dels nous processos químics i la seva aplicació en la indústria.

El desenvolupament de la teoria de la relativitat d'Albert Einstein el 1905 va tenir l'origen en una crítica de la interpretació que havia fet Maxwell sobre la llei de Faraday de la inducció electromagnètica. Einstein, en l'anàlisi maxwellià, va identificar una aparent contradicció entre dos casos d'inducció elèctrica, primer quan el conductor roman estacionari i l'imant es mou, i quan és l'imant el que roman estacionari i és el conductor el que es mou. Encara que Einstein va criticar aquest aspecte de la teoria de Maxwell, va intuir la teoria de la relativitat com a resultat directe, i en cert sentit la conclusió natural del treball de Faraday, Maxwell i Lorentz. Einstein considerava Faraday l'iniciador de la teoria del camp electromagnètic, que representava una ruptura crucial amb l'antiga concepció mecànica de la natura. Encara que Einstein no ha estat l'únic, sí que ha estat el científic més il·lustre que ha atribuït a Faraday una de les innovacions teòriques més profundes de la física. De les parets del despatx d'Einstein penjaven, en reconeixement als precursors de les seves teories, les fotografies de Faraday i Maxwell.

Si tenim en compte la magnitud i l'abast dels seus descobriments i la seva influència en el progrés de la ciència i de la indústria, no hi ha honor massa gran per pagar la memòria de Faraday, un dels descobridors i científics més grans de tots els temps. L'any 1903 es va fundar en el seu honor la Faraday Society, societat que vuitanta anys després es va unir a d'altres organitzacions científiques similars per formar la Royal Society of Chemistry.

2

IMPORTÀNCIA DE LES PUBLICACIONS DE MICHAEL FARADAY EN LA DEFINICIÓ D'UN NOU CAMP DE LA QUÍMICA: L'ELECTROQUÍMICA

Michael Faraday, professor de la Chemistry Royal Institution i membre de la Royal Academy of Science, va dedicar molts anys de la seva vida a les investigacions experimentals en electricitat. D'entre totes les seves investigacions, l'interès d'aquest llibre se centra en els estudis i experiments que va fer, així com en les interpretacions d'estudis realitzats per d'altres investigadors, respecte a la relació entre circulació d'electricitat i reaccions químiques induïdes. Aquests estudis el van portar a descobrir, analitzar i generalitzar els resultats del que ell va anomenar la *descomposició de compostos per l'acció del pas de corrents elèctrics*, quan aquests compostos es trobaven en dissolució o en estat fos. Podem dir que els resultats d'aquests estudis van ser l'origen del que actualment coneixem com a *lleis de Faraday*, fonament i ànima de l'electroquímica.

Com a conseqüència del treball de Faraday, centrant-nos en els seus experiments sobre corrent elèctric i transformació química, es

va començar a parlar de processos electroquímics. Faraday no únicament va assentar les bases de les lleis generals d'aquestes transformacions, objecte de la part de la química que ara anomenem *electroquímica*, sinó que li va donar la nomenclatura que continuem utilitzant actualment, amb poques modificacions respecte a la definició original. Els conceptes d'electroquímica iònica: *ió*, com a espècie carregada amb capacitat de moure's sota un camp elèctric, *anió* o *catió*, com a ions carregats negativament o positivament, o el concepte de *dissolucions conductores* com a conseqüència de la presència d'espècies carregades en aquestes dissolucions, són conceptes introduïts per Faraday en els seus treballs de 1833. També proposà que no únicament les dissolucions són sistemes conductors d'electricitat, sinó també les sals foses. De la mateixa manera, va fonamentar els conceptes i noms relacionats amb les transformacions electroquímiques (*electro-químiques* en nomenclatura de M. Faraday), entenent com a tals les induïdes per un pas d'electricitat a través d'una dissolució amb ions o a través d'una sal fosa (*cos en estat fos*). Així Faraday va proposar el concepte i nom de *electròlisi* per a allò que ell anomenava *descomposició electroquímica* produïda pel pas de corrent. Aquesta denominació va ser conseqüència de l'observació, durant els seus experiments, principalment de l'electròlisi de l'aigua, de manera que fent passar electricitat entre dos pols per a una dissolució (inicialment va pensar que l'aigua era la causant de la conductivitat, fins que es va adonar que com més pura menys conductora era) es produïa la «descomposició» de l'aigua en hidrogen i oxigen. Encara que els processos electroquímics induïts produïen tota mena de transformacions, va continuar parlant de *descomposició electroquímica*. Actualment diríem que l'electròlisi produeix transformacions químiques amb bescanvi d'electrons.

Simultàniament a la definició de *anions* i *cations*, Faraday va introduir el concepte de *ànode* i *càtode* com a noms específics de *elèctrodes* (nom proposat en substitució de *pols*, emprat fins aleshores). A les espècies capaces de ser transformades (*electrolitzables*) durant un procés d'electròlisi (*electrolització*) les va anomenar *electròlits*. Per tant, podem dir que va ser també el pare de l'electroquímica que anomenem *electròdica*, en el sentit que estudia els processos que tenen lloc en les interfases elèctrode-dissolució.

Com ja s'ha comentat anteriorment, Faraday era un experimentador i divulgador incansable, el qual feia la difusió dels resultats dels seus experiments mitjançant conferències freqüents i extenses a la Royal Institution, procediment habitual a l'època de la qual parlem. Els diferents resultats de Faraday conduents a generalitzar els resultats de la interacció entre corrent elèctric i transformació de substàncies els va presentar en forma de conferències a la Royal Institution, les quals van ser publicades a *Philosophical Transactions*, especialment durant el bienni 1833-1834. Aquests estudis són una part de les catorze sèries corresponents a les investigacions experimentals en electricitat, publicades en el període 1831-1838.

En realitat, no podem escollir un únic article que condueixi a la presentació i generalització dels resultats d'electròlisi de Michael Faraday, ja que les conclusions extretes i la generalització de resultats proposada es va anar gestant i publicant de manera gradual en diferents articles. Per això hem seleccionat els quatre articles científics (en realitat quatre seccions) de la mateixa sèrie d'articles anomenada *Experimental Researches in Electricity* que ens semblen més rellevants per arribar al que podem anomenar *lleis de Faraday de l'electròlisi*:

Michael Faraday. *Experimental Researches in Electricity*.

Tercera sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1833), vol. 123, p. 23-54, DOI: 10.1098/rstl.1833.0006. 7. «Identity of Electricities derived from different sources».

Quarta sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1833), vol. 123, p. 507-522, DOI: 10.1098/rstl.1833.0022. 9. «On a new Law of Electric Conduction».

Cinquena sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1833), vol. 123, p. 675-710, DOI: 10.1098/rstl.1833.0030. 11. «On Electrochemical Decomposition».

Setena sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1834), vol. 124, p. 77-122, DOI: 10.1098/rstl.1834.0008. 11. «On Electro-chemical Decomposition, continued».

La selecció d'aquestes seccions de les investigacions en electricitat s'ha fet amb l'objectiu de conduir a la generalització dels resultats de les transformacions químiques en processos d'electròlisi. Per això, en primer lloc s'ha escollit la part d'estudi de l'equivalència entre els diferents tipus d'electricitat per arribar a poder parlar de manera general d'electricitat, sigui produïda per la causa que sigui, ja que en qualsevol cas provoca els mateixos efectes. En aquest estudi va ser fonamental analitzar l'equivalència sobre la transformació química de les substàncies com a prova que l'electricitat produïda de diferents maneres podia ser equivalent. En segon lloc, s'ha seleccionat una secció sobre com es poden descriure les lleis generals d'aquesta electricitat o aquestes electricitats. I en tercer lloc, es recullen les dues seccions més centrades en les conseqüències de l'electricitat sobre les transformacions químiques de diferents substàncies.

La manera exhaustiva de Faraday de descriure els experiments realitzats, moltes vegades amb descripcions força reiteratives, i l'estil

de l'època, més cerimoniós i menys concret que l'emprat actualment, es tradueixen en una gran extensió de cadascun dels articles anomenats. És per això que, atesa la llargària d'aquest conjunt d'articles, presentarem una traducció de les parts més rellevants de cadascun per poder arribar a les lleis generals dels processos electrolítics.

Mantenim la manera de citar els treballs que figura a les publicacions originals. Al peu de cada pàgina i sense els noms dels autors.

Les conclusions fonamentals deduïdes per Faraday en cadascuna d'aquestes seccions de l'estudi de l'electricitat i els seus efectes sobre la transformació de substàncies les podem concretar de la manera que exposem a continuació.

Podem considerar única l'electricitat encara que es produeixi de diferent manera («Identitat de les electricitats derivades de diferents fonts»)? En el moment de la redacció d'aquesta primera secció, aquest fet s'estava debatent i es parlava de diferents tipus d'electricitat, segons es produís per una causa o una altra, per exemple, electricitat comuna (produïda per fricció), electricitat voltaica (conseqüència de la produïda emprant una pila) i, fins i tot, electricitat animal, com l'existent a l'interior dels éssers vius. L'estudi de les conseqüències que, per exemple, l'electricitat produïda provocava sobre els processos anomenats per Faraday de *descomposició electroquímica*, va ajudar l'investigador a proposar que l'electricitat hauria de ser equivalent independentment del seu origen. Així, en experimentar amb el pas d'electricitat per dissolucions (una gota sobre una placa de vidre) de sulfat de coure, va trobar que es produïa coure metàl·lic en un dels cables (de platí) introduïts a la dissolució, tant quan el corrent era produït per una bateria voltaica com quan era conseqüència de la descàrrega d'electricitat comuna (estàtica) emmagatzemada. O bé es produïa hidrogen i oxigen a partir de l'aigua, però en quantitat diferent en funció de la quantitat d'electricitat passada.

Una vegada plantejada l'equivalència d'efectes produïts per l'electricitat amb diferent origen, va proposar la «Generalització del poder conductor». En aquesta secció va extreure algunes conclusions generals sobre els resultats experimentals de *descomposició electroquímica*. La principal conclusió va ser relacionar les transformacions químiques produïdes pel pas de corrent amb la conducció del medi a partir del qual es produïen. Per exemple, va concloure que no era l'aigua la que presentava conductivitat, a pesar que l'aigua es descomponia pel pas d'electricitat, sinó que eren les sals dissoltes a l'aigua les que li conferien aquesta conductivitat i permetien la descomposició. La conductivitat condicionava la transformació. Però després d'aquest estudi encara tenia dubtes sobre el tipus de substàncies i la forma en què es trobaven, que podien transformar-se o no aplicant un corrent elèctric.

En els estudis més exhaustius recollits a les seccions «Sobre la descomposició electroquímica», és on va aclarir més aspectes sobre la *descomposició electroquímica* i va introduir noves paraules per definir aquests nous conceptes que va proposar. Faraday va concloure que els processos de transformació es produïen únicament als pols o cables introduïts a la dissolució, als quals va anomenar *elèctrodes* i que va definir com 'les substàncies o superfícies que limiten o controlen la descomposició de la matèria en el sentit del corrent'. Va proposar que l'*electròlisi* (nom emprat per substituir el de *descomposició electroquímica*) era conseqüència de dos processos diferents als dos elèctrodes, un dels quals anomenat *ànode* i definit com 'la superfície per la qual entra el corrent elèctric', i l'altre anomenat *càtode* i definit com 'la superfície per la qual surt el corrent elèctric'. Un dels efectes dels corrents elèctrics era, per tant, l'acció electrolítica d'aquests corrents. Les noves substàncies produïdes als elèctrodes diferents no

es recombinaven per donar la substància original. No tots els cossos es podien descompondre per electròlisi i els que sí que podien els va anomenar *electròlits*. Per exemple, va plantejar que l'àcid clorhídric (*mu-riàtic*) era un electròlit mentre que l'àcid bòric no ho era.

Faraday va mostrar que el procés d'electròlisi era conseqüència del pas d'electricitat, que facilitava la ruptura de les substàncies, és a dir, debilitava l'afinitat química a l'interior d'aquestes. També va concloure que una quantitat constant d'electricitat (ara en diríem *càrrega*) produïa sempre la mateixa transformació o una determinada substància en un procés d'electròlisi. El corrent i les seves conseqüències són, per tant, proporcionals. Els números que corresponen a les proporcions en les quals les substàncies evolucionen o es transformen durant el procés d'electròlisi van ser definits per Faraday com a *equivalents electroquímics*.

3

PUBLICACIONS DE MICHAEL FARADAY QUE CONDUEIXEN A LES LLEIS DE FARADAY DE LA DESCOMPOSICIÓ ELECTROQUÍMICA (EXTRACTES)

3.1. IDENTITAT DE LES ELECTRICITATS DERIVADES DE DIFERENTS FONTS

Experimental Researches in Electricity. Tercera sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1833), vol. 123, p. 23-54,
DOI: 10.1098/rstl.1833.0006.

Les meves investigacions sobre electricitat m'han portat a proposar la identitat dels diferents tipus d'electricitat coneguts (comuna, produïda per fricció, animal, a l'interior dels éssers vius, i voltaica, produïda per una pila), basant-me també en els estudis de Henry Cavendish,¹ William Hyde Wollaston² i Jean-Daniel Colladon.³ Aquests investigadors han eliminat algunes de les grans objeccions a considerar la identi-

1. *Philosophical Transactions* (1776), p. 196.

2. *Philosophical Transactions* (1801), p. 434.

3. *Annales de Chimie* (1826), p. 62.

tat de les diferents electricitats, encara que, per exemple, alguns dels experiments de Wollaston⁴ s'han considerat incorrectes.

Altres investigadors dubten que aquesta identitat entre les diferents electricitats estigui realment provada. Sir Humphry Davy⁵ va pensar que l'electricitat animal es podia considerar diferent de les altres: «L'electricitat comuna s'excita als no conductors i és portada pels conductors veritables i imperfectes. L'electricitat voltaica s'excita en combinacions de conductors perfectes i imperfectes i només es transmet a través de conductors perfectes o imperfectes però l'electricitat animal resideix només en conductors imperfectes que formen els òrgans dels animals vius».

Per tant, la resposta a la pregunta «totes les electricitats produïdes per diferents causes són iguals?» fins ara no és clara. Intento exposar ara els meus resultats per ajudar a clarificar aquesta qüestió. La mesura de la càrrega elèctrica es fa majoritàriament emprant un electròmetre de pa d'or (*electrometer gold-leaves*), el qual consisteix en dues fines fulles de pa d'or suspeses sobre un elèctrode. Quan l'elèctrode es carrega per inducció o contacte, les dues fulles es carreguen amb el mateix signe i es repel·leixen.

Vaig analitzar si l'electricitat comuna i la generada voltaicament es descarreguen fàcilment a través de l'aire, emprant com a tests o bé el pas d'electricitat en un galvanòmetre o bé l'acció química produïda. Com que l'electricitat comuna es descarrega amb més facilitat a través d'aire calent, jo esperava que l'electricitat voltaica també es pogués descarregar d'aquesta manera. Vaig intercalar un dispositiu de descomposició química al circuit per veure els efectes de l'electricitat passada.

4. *Philosophical Transactions* (1832), p. 282.

5. *Philosophical Transactions* (1829), p. 17.

Quan es van aplicar potencials grans amb la bateria o es va escalfar força l'aire entre els extrems del circuit es va produir descomposició química o es va produir resposta de l'electròmetre.

D'altra banda, quan els dos conductors de la bateria Leyden es van connectar amb els pols d'una bateria voltaica, la bateria Leyden es va carregar immediatament (la bateria o ampolla de Leyden és un dispositiu senzill per emmagatzemar electricitat estàtica).

Per tant, sembla que ambdós tipus d'electricitat produeixen efectes similars. Comprovem aquest fet veient els efectes dels corrents elèctrics, ja que la circulació d'un corrent voltaic per cables o fluids produeix generació de calor, o capacitat de moure una agulla magnètica, o descomposició química, o convulsions o afectació de llengua i ulls sobre el sistema animal, o formació d'espurnes.

Quan l'electricitat comuna passa a través de cables o d'altres substàncies, es produeix evolució de calor, igual que l'electricitat produïda per una bateria voltaica. També ambdues provoquen la desviació de l'agulla magnètica, encara que l'efecte ocasionat pel corrent voltaic és més acusat. Colladon, de Ginebra, considera que, quan s'utilitza una bateria i un galvanòmetre delicat, s'aconsegueixen deflexions similars de l'agulla magnètica. Els meus experiments confirmen plenament els de Colladon, i proven l'acció magnètica i química de l'electricitat. Quan l'electricitat va circular en una determinada direcció, l'agulla magnètica va moure's en un sentit, però quan va circular en direcció contrària, l'agulla també es va moure en el sentit contrari. En el canvi de la direcció del corrent a través del galvanòmetre, també es va canviar la direcció de la deflexió de l'agulla. En tots els casos el moviment de l'agulla va ser el mateix pel que fa a la direcció que el causat per l'ús d'una bateria elèctrica o una de voltaica.

El segon gran efecte del pas d'electricitat voltaica és la descompo-

sició química quan alguns cossos s'intercalen entre els pols. Wollaston va mostrar que l'electricitat comuna s'assemblava en aquests efectes,⁶ i que tots dos fenòmens són essencialment el mateix.

Respecte a això, he analitzat els experiments de Wollaston i n'he realitzat d'altres per a demostrar la possibilitat de la descomposició *electro-química* (nom introduït per Faraday, amb dues paraules unides per un guionet, que actualment substituiríem per *electroquímica*) produïda per una pila o per electricitat comuna. Descriuré el resultat d'alguns d'aquests experiments.

Quan l'electricitat produïda per una bateria voltaica es va fer passar per una gota de dissolució de sulfat de coure dipositada sobre una placa de vidre i es van introduir els extrems dels dos cables de la bateria en aquesta dissolució, va aparèixer coure metàl·lic sobre un dels cables. Per tant, es va produir el que podem dir *descomposició química*.

De la mateixa manera, quan es va descarregar electricitat comuna i es van introduir els extrems del circuit, de platí, en una gota de la dissolució de sulfat de coure, també es va produir la precipitació de coure en un dels extrems, el qual ara semblava un fil de coure. En aquest cas, els extrems de platí es van convertir en els pols de descomposició.

Quan es va posar una gota d'una barreja d'àcid muriàtic (àcid clorhídric), aigua i sulfat d'indi, de color blau, sobre el vidre i s'hi va fer passar electricitat, es va produir el blanqueig al voltant d'un dels pols com a conseqüència de l'evolució de clor i, una vegada barrejada la gota, es va tornar incolora.

Quan es va fer el mateix experiment amb una gota de dissolució de iodur de potassi barrejat amb midó es va produir iode en un dels pols.

6. *Philosophical Transactions* (1801), p. 427, 429, 434.

El pas de corrent a través d'un tros de paper de tornassol humitejat en una solució de sal comuna o sulfat de sodi va fer aparèixer color vermell ràpidament en un dels extrems i una peça similar humitejada amb àcid muriàtic es va blanquejar ràpidament. Un dels extrems d'un paper de cúrcuma humitejat en una solució de sulfat de sodi es va enrogir i amb més quantitat de pas d'electricitat es va formar abundant àlcali. Quan es va girar el paper i s'hi va passar electricitat una altra vegada, l'àlcali aviat va desaparèixer.

Aquests experiments d'acció química són a vegades una prova més sensible del pas de corrents elèctrics que un galvanòmetre. Per a aquests experiments, únicament s'ha de produir la conducció pel circuit.

També vaig repetir l'atractiu experiment de Cavendish, en el qual es forma àcid nítric per la combinació de l'oxigen i el nitrogen de l'aire. L'àcid així format, encara que en petita quantitat, està concentrat respecte a l'aigua, i produeix els efectes d'enrogir el paper de tornassol o de prevenir l'observació de l'àlcali en el paper de cúrcuma o d'actuar sobre el iodur de potassi per produir iode.

Ja he tingut ocasió de referir-me a un experiment de Wollaston i he demostrat la identitat de les electricitats voltaica i ordinària. Wollaston va trobar que l'aigua es podia descompondre únicament amb l'electricitat comuna descarregada per un circuit, i produir dos corrents de gas en els extrems, i que això era idèntic a l'efecte ocasionat per l'electricitat voltaica, que produïa una barreja de gasos d'oxigen i hidrogen. Aquest experiment és una repetició, d'una manera refinada, de l'experiment realitzat pel doctor George Pearson el 1797,⁷ i anteriorment per Adriaan Paets Van Troostwyk i Jan Rudolph Dei-

7. *Nicholson's Journal* (1810), tom 4, vol. 1, p. 241, 299, 349.

man el 1789 o abans, encara que l'experiment no s'ha citat com a prova de descomposició electroquímica.

L'aigua es descompon als dos pols independentment un de l'altre, i l'oxigen i l'hidrogen evolucionen perquè són els elements que existeixen a l'aigua abans de l'experiment. Es pot demostrar que els pols o els punts de descomposició no tenen una dependència mútua a la descomposició mitjançant la substitució d'un fil per un altre, encara que es deté el procés en el pol canviat. De tota manera l'aigua es descompon si conté una certa quantitat de sulfat de sodi. Si se substituïa la solució de sulfat de sodi per aigua, s'observava molt poc despreniment de gas. Dels dos corrents de gas, quan es produïa la descomposició de l'aigua a partir d'una dissolució, un semblava més abundant que l'altre.

Quan la descomposició electroquímica té lloc, hi ha una gran raó per creure que la quantitat de matèria en descomposició és proporcional a la quantitat d'electricitat que passa. D'això en podré oferir algunes proves més endavant.

A partir dels meus experiments no es pot dubtar que Wollaston era encertat en la seva conclusió general i que les electricitats voltaica i comuna tenen poder de descomposició química i es regeixen per les mateixes lleis.

3.2. UNA NOVA LLEI DE LA CONDUCCIÓ ELÈCTRICA. GENERALITZACIÓ DEL PODER CONDUCTOR

Experimental Researches in Electricity. Quarta sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1833), vol. 123, p. 507-522,
DOI: 10.1098/rstl.1833.0022.

Durant els experiments de descomposició electroquímica he trobat unes lleis generals.

Puc proposar una primera llei: algunes substàncies són conductores en estat líquid però perden el seu poder conductor quan passen a l'estat sòlid. Aquesta llei la vaig observar amb l'aigua però es podria estendre a d'altres substàncies. Vaig escollir substàncies sòlides a temperatures comunes però que es poguessin fondre. Observant els resultats dels experiments vaig trobar que aquesta llei es podia aplicar a l'aigua, alguns òxids, com òxids de plom o de bismut, clorurs de potassi, sodi, estronci, coure, estany, plata..., iodurs de potassi, zinc i plom, fluorur de potassi, cianur de potassi, sals com clorat de potassi, nitrat de potassi, de coure, de plom..., sulfurs d'antimoni, de potassi, etc.

Contràriament, d'altres substàncies no segueixen aquesta llei, com el sofre, el iode, l'àcid acètic glacial, la cafeïna, el sucre, la naftalina, la resina, etc.

En el cas de l'aigua el poder conductor és baix i incrementa quan s'hi afegeixen sals.

Els compostos que acompleteixen aquesta llei sembla que tenen certs elements que són atrets pels pols oposats. Vaig observar que quan la conducció té lloc es produeix la descomposició. Quan la descomposició cessa, la conducció també.

Però hi ha substàncies que contenen elements que haurien de separar-se en els pols de la pila però no es descomponen, i per tant sembla que no tenen poder conductor. Algunes d'aquestes substàncies són el iodur de sofre, el clorur d'arsènic, l'àcid acètic... Per tant, podria ser que la descomposició depengués del poder conductor i no al revés. Quan un sòlid passa a fluid, perd el poder de conducció per calor però guanya el poder de conducció per electricitat. Seria molt interessant trobar la relació entre els dos poders de conducció.

Després de fer experiments amb molts compostos puc atrevir-me a generalitzar les conclusions següents:

- Tots els cossos condueixen l'electricitat de la mateixa manera però en graus molt diferents.
- El poder conductor en alguns cossos augmenta amb la calor i en d'altres disminueix.
- Molts cossos aïllen l'electricitat de baixa intensitat quan són sòlids però condueixen l'electricitat quan són fluids, i l'electricitat en provoca la descomposició.
- Però també hi ha molts cossos fluids que no són sensibles a conduir l'electricitat a baixes intensitats. També n'hi ha alguns que en estat fluid no condueixen l'electricitat. Per tant, la fluïdesa no és essencial per a la descomposició.
- També hi ha cossos que aïllen un corrent voltaic quan estan en estat sòlid i condueixen en estat fluid, però no es descomponen en aquest estat.
- Per tant, encara no hi ha una distinció clara, respecte a la conducció, entre els cossos suposadament elementals i els coneguts com a compostos.

3.3. SOBRE LA DESCOMPOSICIÓ ELECTROQUÍMICA

Experimental Researches in Electricity. Cinquena sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1833), vol. 123, p. 675-710,
DOI: 10.1098/rstl.1833.0030.

Experimental Researches in Electricity. Setena sèrie. *Phil. Trans.* [R. Soc. Lond.] (1 gener 1834), vol. 124, p. 77-122,
DOI: 10.1098/rstl.1834.0008.

He provat la identitat entre l'electricitat provinent de diferents fonts i he vist l'equivalència entre els experiments fets amb una màquina d'electricitat comuna i amb una bateria voltaica. La diferència

entre aquests dos dispositius és la distinta quantitat d'electricitat produïda, normalment petita en el primer cas i molt gran en el segon. Però els seus efectes han estat els mateixos.

L'electricitat produïda per aquestes màquines es pot utilitzar per estudiar més profundament les descomposicions electroquímiques i extreure'n més conclusions.

Com a resultat de repetitius experiments de descomposició es pot concloure que quan es realitzen sobre paper de tornassol i paper de cúrcuma units, sempre apareix àcid al pol negatiu i àlcali al positiu.

Segons molts autors, especialment Sir Humphry Davy, la presència d'aigua és fonamental, tant en la descomposició electroquímica com en l'evolució d'electricitat en la bateria voltaica. Però també es produeix descomposició electroquímica, com he demostrat, amb d'altres substàncies sense la presència d'aigua, com moltes en estat fos. A partir d'aquests resultats, em va interessar proposar una teoria sobre la descomposició electroquímica.

Theodor von Grotthuss, l'any 1805,⁸ va considerar una pila com un agent atractiu i repulsiu. És a dir, els pols tenen poder d'atracció i de repulsió. Un dels pols atrau hidrogen i repel·leix oxigen, mentre que l'altre actua al revés. Per tant, cada element constituït de l'aigua està subjecte a una força atractiva o repulsiva que actua en sentit contrari. Aquest autor justifica l'aparició dels elements en forma de gasos com una sèrie de descomposicions i recombinacions en les molècules d'aigua per les quals passa l'electricitat.

Sir Humphry Davy va utilitzar, el 1806 i 1807,⁹ expressions més específiques per parlar de les descomposicions electroquímiques. Ell

8. *Annales de Chimie* (1806), tom LVIII, p. 64.

9. *Philosophical Transactions* (1807), p. 28-30.

refereix la descomposició a l'atracció dels pols i suposa que les atraccions o repulsions es comuniquen des d'una partícula a una altra del mateix tipus, i va disminuint la seva força fins a la posició intermèdia entre els pols, que ha de ser necessàriament neutra. El poder disminueix en augmentar la distància als pols. Per exemple, una dissolució de sulfat de potassi de deu polzades de longitud es descompon durant les dues polzades més properes als pols però no a una distància de quatre polzades.

Nicolas Maurice Chompré, el 1807, va considerar un corrent negatiu aquell que recull i transporta els àcids vers el pol positiu i un corrent positiu el que fa el mateix amb les bases i les transporta cap al pol negatiu.¹⁰ Suposa que el corrent és més fort a prop dels pols i que el corrent positiu és més fort que el negatiu.

Jean Baptiste Biot va proposar que els fluids en experiments de descomposició són més positius a prop del pol positiu, disminueixen la positivitat gradualment fins a ser neutres al mig i van agafant negativitat en apropar-se al pol negatiu.¹¹

Quan una partícula de sal es descompon al pol negatiu, la partícula d'àcid adquireix estat elèctric negatiu del pol, és repel·lit per aquest pol i es mou cap al pol positiu, que també l'atreu. Aquesta teoria suposa que la descomposició té lloc als dos pols sobre diferents porcions del fluid i no en tot el fluid.

Auguste de la Rive va investigar aquest fet el 1825¹² i va considerar que les porcions de matèria que es descomponen són les contigües als pols, mentre que les intermèdies queden inalterades, o almenys aquestes parts actuen únicament permetent el pas d'electricitats

10. *Annales de Chimie* (1807), tom LXIII, p. 83.

11. *Précis Élémentaire de Physique* (1824), 3a ed., tom. 1, p. 637.

12. *Annales de Chimie* (1825), tom XXVIII, p. 197.

contràries cap als pols diferents. La descomposició de l'aigua o la sal tindrà lloc únicament a prop dels pols i no es produirà recombinació. El 1832, diu que no és necessari per a la descomposició de l'aigua que les dues electricitats, positiva i negativa, siguin simultànies.¹³

Proposo ara les meves idees sobre això.

Penso que totes les teories mostren que la descomposició electroquímica té lloc en el poder atractiu dels pols. Però la força varia amb la distància als pols i amb la forma del recipient que conté les substàncies que es descomponen. Resumeixo els resultats de la meua teoria de la manera següent: *Per a una quantitat constant d'electricitat, per qualsevol conductor que es descompon com aigua, solucions salines, àcids o cossos fosos, la quantitat d'acció electroquímica és també una quantitat constant, és a dir, podria sempre ser equivalent a un efecte químic estàndard basat en l'afinitat química ordinària.*

La descomposició electroquímica depèn essencialment del corrent d'electricitat. En certs casos, la descomposició és proporcional a la quantitat d'electricitat passada i segurament es pot comprovar que s'esdevé en tots els casos. Respecte a l'existència d'una electricitat positiva i una altra de negativa que puguin actuar separatament, no he estat capaç de detectar-les. *Proposo en aquest sentit un eix de poder que té forces contràries, exactament igual en quantitat però en direccions contràries.*

Penso que la descomposició electroquímica està produïda per una acció corpuscular interna, exercida d'acord amb la direcció del corrent elèctric, i que és deguda a la força superposada a l'afinitat química ordinària dels cossos presents. El cos que es descompon es pot considerar una massa de partícules que actua sota l'acció del corrent

13. *Annales de Chimie* (1832), tom II, p. 73.

elèctric, que és el que contribueix a l'efecte final. L'afinitat química ordinària és debilitada o neutralitzada pel corrent elèctric en una direcció i enfortida en la direcció contrària, de manera que les partícules combinades tenen tendència a passar en direccions oposades.

En un compost capaç de ser descompost electroquímicament, les partícules elementals tenen una relació mútua entre si, que s'estén més enllà de les que són immediatament combinades. Aleshores, en l'aigua, una partícula d'hidrogen en combinació amb oxigen es considera que no és indiferent a d'altres partícules d'oxigen, encara que aquestes estiguin combinades amb d'altres partícules d'hidrogen. Així, sota l'acció d'un corrent elèctric, totes poden exercir una influència en una mateixa direcció. Això està relacionat amb l'agregació o atracció que apareix en els diferents cossos. En els gasos, on no hi ha agregació, el poder descomponent de l'electricitat cessa. Sembla que la inhabilitat per experimentar descomposició química té a veure amb l'absència d'agregació entre les partícules per mútua atracció.

Suposo que l'efecte del pas d'electricitat sobre la descomposició electroquímica té a veure amb el fet que el corrent elèctric modifica l'afinitat química de les partícules, i provoca que actuïn amb més facilitat en una direcció que en la contrària i una sèrie de successives descomposicions en direccions oposades, les quals, al final, causen l'expulsió de les fronteres del cos que es descompon, en la direcció del corrent i en més o menys extensió depenent de la potència del corrent. Sota la descomposició, oxigen, clor, iode, àcids, es produeixen a l'extremitat negativa, i combustibles, metalls, bases, es produeixen a la positiva.

Durant els processos de descomposició l'evolució té lloc únicament als pols, els quals són les superfícies limitants. Excepte als pols, cada partícula troba una altra partícula amb tendència contrària,

amb la qual es combina. Les substàncies produïdes són despreses de la massa de descomposició. Algunes d'aquestes substàncies queden retingudes sobre els pols i d'altres no, depenent de la relació química entre les partícules produïdes i la natura dels pols.

Després de les teories preliminars sobre la descomposició electroquímica com a conseqüència del pas d'electricitat, crec que ara sóc capaç de generalitzar la meua teoria i introduir nous conceptes relacionats amb el procés. La meua teoria es basa en els resultats i propostes d'investigadors anteriors i en els meus propis experiments al laboratori.

Podem introduir el concepte de *pol*, que pot ser negatiu i positiu, i els termes *atracció* i *repulsió*. En general es pot dir que el pol positiu atrau oxigen, àcids... o, de manera més cautelosa, en determina l'evolució sobre la superfície del pol. I el pol negatiu actua de la mateixa manera sobre l'hidrogen, combustibles, metalls i bases. Des del meu punt de vista, les forces no estan als pols sinó al cos que es descompon, i els compostos es formen a les extremitats positiva i negativa. Per evitar confusions, he decidit proposar nous termes per explicar els fenòmens. Els pols, com usualment s'anomenen, són únicament les portes a través de les quals el corrent elèctric entra o surt del cos que es descompon. Aquest terme, *pol*, s'emptra normalment per a les superfícies metàl·liques en contacte amb la substància que es descompon. En substitució del terme *pol* proposo utilitzar el terme *elèctrode*, entenent com a tal la substància o la superfície que limita o controla la descomposició de la matèria en la direcció del corrent elèctric. També proposo utilitzar el terme *ànode* per a la superfície per la qual entra el corrent elèctric i que és l'extremitat negativa del cos que es descompon, oposada a l'elèctrode positiu; és on l'oxigen, el clor, els àcids, etc., evolucionen. El *càtode* és la superfície per la qual

el corrent abandona el cos que es descompon i és la seva extremitat positiva. Els combustibles, metalls, bases, etc., evolucionen aquí i estan en contacte amb l'elèctrode negatiu.

Molts cossos es descomponen directament pel corrent elèctric, i alliberen els seus components. Proposo anomenar aquests cossos *electròlits*. Per tant, l'aigua no pura és un electròlit. Els cossos com els àcids nítric o sulfúric es descomponen d'una manera secundària i no estan inclosos en aquest nou terme. Per als compostos electroquímicament descompostos, utilitzaré el terme *electrolitzats*, terme que implica que el cos se separa en els seus components per acció de l'electricitat. Relacionat amb això, pot introduir-se el terme *electrolític*. L'àcid muriàtic és electrolític, l'àcid bòric, no.

Fins ara s'ha dit que les substàncies poden ser electronegatives o electropositives, d'acord amb la influència de l'atracció sobre aquestes del pol positiu o negatiu. Però prefereixo introduir nova nomenclatura i anomenar *anions* les substàncies que van cap a l'ànode del cos que es descompon. I les que van al càtode, *cations*. I quan tingui ocasió de parlar dels uns i els altres, parlaré de *ions*. Amb aquesta nomenclatura, el clorur de plom és un electròlit, i quan s'electrolitza evolucionen els dos ions, clor i plom, el primer dels quals és un anió i l'últim, un catió.

En electròlits, el poder de transmetre l'electricitat depèn de la seva capacitat per experimentar descomposició. La diferència de comportament de compostos binaris em porta a veure si hi ha una llei general que reguli la «capacitat de descomposició» en funció de les proporcions o relacions entre els diferents elements del compost. Així, els òxids, clorurs i iodurs són descomponibles, excepte el clorur d'antimoni o el periodat. Penso que l'àcid sulfúric no ha de ser conductor, però trobo que és pitjor conductor quan és més pur que quan

està diluït. Si faig l'experiment d'aplicar a l'àcid sulfúric un corrent fort mitjançant una bateria, apareix oxigen a l'ànode o elèctrode positiu, mentre que apareix hidrogen i sofre al càtode o elèctrode negatiu, la qual cosa demostra que l'aigua ha experimentat descomposició. M'he esforçat per fer el mateix experiment amb sulfúric anhidre, en estat fos, i crec que no és conductor i no es descompon. Però l'àcid del qual dispo no és suficientment sec i ho no puc assegurar. Crec que quan apareix sofre en els experiments de la bateria sobre l'àcid sulfúric, és conseqüència d'una reacció secundària i no del fet que el propi àcid sigui descomponible.

Fent experiments similars amb d'altres àcids com el fosfòric, l'arsènic o el nítric, penso que tenen capacitat de conducció i descomposició en aigua però que això no prova que experimentin aquestes accions sols.

Compostos com el clorur de sofre no són conductors i no es descomponen. Per tant, no tots els compostos que tenen proporcions simples dels seus elements es descomponen.

Realitzant molts experiments amb molta precisió en les mesures, he proposat un principi extraordinari i important respecte a l'aigua. Quan s'afegeixen a l'aigua diferents compostos conductors i s'hi fa passar un corrent molt controlat, els canvis en la composició de les dissolucions no alteren la constància de l'acció electrolítica sobre l'aigua. *Quan l'aigua està subjecta a l'acció d'un corrent elèctric, es descompon una quantitat d'aquesta exactament proporcional a la quantitat d'electricitat passada.*

He dissenyat un *volta-electròmetre* per poder realitzar mesures amb una gran precisió. Abans de poder utilitzar el *volta-electròmetre* per fer mesures precises durant els experiments electroquímics es van extreure algunes conclusions errònies sobre els experiments. Amb

l'ajuda d'aquest instrument, he pogut establir el caràcter definitiu de l'acció electroquímica en el sentit més general: quan determinades substàncies es descomponen al pas de l'electricitat i es mantenen als elèctrodes sense recombinar-se com, per exemple, l'aigua, que evoluciona a hidrogen i oxigen, això es pot considerar un resultat primari. També l'àcid i la base que es formen a partir del sulfat de sodi. Però quan les substàncies separades per un corrent canvien a l'elèctrode abans de la seva aparició, això es pot considerar un resultat secundari, encara que en molts casos, els cossos que evolucionen són elementals.

Aquests resultats secundaris tenen lloc de dues maneres, moltes vegades com a conseqüència de la interacció entre els cossos que evolucionen i el material dels elèctrodes o amb el propi cos de descomposició. Així, quan en dissolucions diluïdes d'àcid sulfúric, el carbó és l'elèctrode positiu, a part de formar-se oxigen pot aparèixer ocasionalment àcid carbònic.

Una solució d'amoníac pur és un conductor dolent i, per tant, té poca tendència a l'electrolització, com l'aigua pura. Però quan s'hi dissol sulfat d'amoni, la solució es fa conductora; el nitrogen bastant pur evoluciona a l'ànode i l'hidrogen, al càtode. La relació de volums formats és 1 (del primer) a 3 o 4 (del segon). Això semblaria indicar que l'amoníac es descompon pel pas d'electricitat. Però quan es mesura exactament l'electricitat mitjançant el *volta-electròmetre* es troba que l'hidrogen obtingut està exactament en la proporció corresponent a la descomposició de l'aigua, mentre que el nitrogen no manté una proporció constant. Fent molts experiments es va trobar que el gas evolucionat a l'ànode va ser una mescla d'oxigen i nitrogen, amb una variació en quantitat i proporció, mentre que al càtode sempre es produïa una quantitat constant. Així es va veure que la

formació de nitrogen era un procés secundari a l'ànode, depenent de l'oxigen i de la quantitat d'amoníac. És a dir, el que s'electrolitzava era l'aigua i no l'amoníac.

Un altre exemple de procés secundari és el procés té lloc en electrolitzar acetat de potassi. Quan s'electrolitza una dissolució forta, es desprèn més gas a l'ànode que al càtode (proporció aproximada 4 a 3). A l'ànode es forma una mescla d'àcid carbònic i diòxid de carboni. Al càtode es forma hidrogen. La formació d'àcid carbònic i diòxid de carboni són processos secundaris. L'electrolització de l'aigua dóna oxigen, que reacciona amb l'àcid acètic. L'hidrogen format és proporcional a la quantitat d'electricitat mesurada.

Puc concloure, a partir de la realització de molts experiments d'electrolització, que les substàncies es poden descompondre de dues maneres quan hi circula un corrent elèctric: directament per l'acció del corrent o bé com a conseqüència dels cossos formats en la descomposició. Això passa tant en dissolució aquosa com en absència d'aigua.

Proposo la llei general següent: *El poder químic d'un corrent d'electricitat és en proporció directa de la quantitat absoluta d'electricitat que passa. Per tant, la massa de substància descomposta en una electròlisi és proporcional a la quantitat d'electricitat que ha passat a través de l'electròlit.* Aquesta llei l'he establert principalment a partir de resultats de la descomposició de l'aigua i de mesures precises de corrent amb el *volta-electròmetre*. Però puc explicar amb detall algun altre experiment com la descomposició del clorur d'estany. Quan es produeix la descomposició pel pas d'un corrent elèctric, entre elèctrodes de platí, el clor evoluciona a l'elèctrode positiu i forma biclorur d'estany, desprenent fums, i l'estany es forma a l'elèctrode negatiu, i forma un aliatge amb el platí. L'elèctrode negatiu augmenta en 3,2 g durant l'experiment. La quantitat d'aigua descomposta simultàniament en

el *volta-electròmetre* és de 12,92 grams. L'equivalent químic de l'estany és, doncs, 57,9.

També és important considerar la natura dels materials utilitzats per a experiments d'electrolització. Per exemple, l'oxigen evoluciona sobre un ànode de platí i no es combina ni reacciona amb aquest, però es combina immediatament amb un ànode de coure, amb la qual cosa els productes observats a l'ànode són diferents però els productes observats al càtode són iguals (hidrogen) i en la mateixa quantitat si la quantitat d'electricitat passada és la mateixa.

Els cossos descomponibles per l'acció d'un corrent elèctric els anomeno *electròlits*. Els números que corresponen a les proporcions en les quals les substàncies evolucionen els denomino *equivalents electroquímics* (taula 1). Puc afinar i resumir ara les definicions següents respecte als conceptes relacionats amb els experiments de descomposició per un corrent elèctric:

- Un compost que es pot descompondre pel corrent (electròlit) ha d'estar format per anions i cations. Els anions es mouen cap a l'ànode i els cations cap al càtode.
- Els anions i els cations que es mouen cap a elèctrodes diferents han de tenir equivalents electroquímics simples.
- El material dels elèctrodes no ha d'afectar la quantitat de substàncies produïdes als elèctrodes encara que sí que pot modificar la velocitat i també pot influenciar la forma en la qual es detecten els productes de descomposició (processos secundaris). Si el material de l'elèctrode es combina amb els productes de la descomposició, ho fa en la proporció corresponent als equivalents electroquímics.
- Les substàncies anomenades *ions* no han d'estar compostes necessàriament per equivalents electroquímics d'ions sim-

ples. Per exemple, l'àcid sulfúric és un ió però no un electròlit. Els equivalents electroquímics són sempre consistents, és a dir, el mateix número que representa l'equivalent d'una substància A, quan se separa d'una B, també representa A quan se separa d'una substància C. Així, 8 és l'equivalent electroquímic de l'oxigen quan se separa de l'hidrogen, de l'estany o del plom.

A partir dels resultats experimentals és evident que diferents cossos tenen diferent facilitat per a la descomposició, és a dir, necessiten diferents intensitats per descompondre's. Una solució de sulfat de sodi pot conduir l'electricitat però no és capaç de descompondre la sal neutra present. Quan aquesta sal està dissolta en aigua, requereix una certa intensitat de corrent per descompondre's i aquesta intensitat és molt més gran que la requerida per a una dissolució similar de iodur de potassi.

La mateixa quantitat d'electricitat pot passar durant el mateix temps, sobre la mateixa superfície, en el mateix cos de descomposició, en el mateix estat i, segons la intensitat, es descompondrà en un cas i en l'altre no.

Un corrent està format per excitació i descàrrega. L'excitació pot tenir lloc per fricció, acció química, calor, canvi de condicions, inducció, etc. La descàrrega pren les formes de conducció, electrolització, descàrrega disruptiva i convecció. El corrent degut a les diferents causes ha de ser el mateix.

Una de les conseqüències del corrent és la seva acció electrolítica. L'efecte causat és constant i definit per la quantitat d'electricitat passada. La intensitat requerida per produir la descomposició ha de ser la necessària per superar l'afinitat o les forces establertes en el cos o compost que es descompon. El corrent i les seves conseqüències són proporcionals.

Si l'aigua es descompon per l'acció d'una bateria voltaica, cada partícula d'hidrogen quan es mou d'una manera i cada partícula d'oxigen quan es mou en la direcció contrària transferiran una certa quantitat de força elèctrica associada a l'afinitat química. Aquest moviment estarà acompanyat per una circulació de forces elèctriques per a cada part del circuit, i això es traduirà en un escalfament del fil conductor del circuit. Així tindrem un moviment molt ràpid de conducció pels fils i l'electrolització en la dissolució.

TAULA 1. *Valors d'equivalents electroquímics de diferents substàncies*

ANIONS, CATIONS, AND ELECTRO-CHEMICAL EQUIVALENTS.			
<i>Cations.</i>			
Hydrogen	1	Tin	57·9
Potassium	39·2	Lead	103·6
Sodium	23·3	Iron	28
Lithium	10	Copper	31·6
Barium	68·7	Cadmium	55·8
Strontium	43·8	Cerium	46
Calcium	20·5	Cobalt	29·5
Magnesium	12·7	Nickel	29·5
Manganese	27·7	Antimony	64·6?
Zinc	32·5	Bismuth	71
		Mercury	200
		Silver	108
		Platina	98·6?
		Gold	(?)
		Ammonia	17
		Potassa	47·2
		Soda	31·3
		Lithia	18
		Baryta	76·7
		Strontia	51·8
		Lime	28·5
		Magnesia	20·7
		Alumina	(?)
		Protoxides generally.	
		Quinia	171·6
		Cinchona	160
		Morphia	290
		Vegeto-alkalies generally.	
<i>Anions.</i>			
Oxygen	8	Cyanogen	26
Chlorine	35·5	Sulphuric acid	40
Iodine	126	Selenic acid	64
Bromine	78·3	Nitric acid	54
Fluorine	18·7	Chloric acid	75·5
		Phosphoric acid	35·7
		Carbonic acid	22
		Boric acid	24
		Acetic acid	51
		Tartaric acid	66
		Citric acid	58
		Oxalic acid	36
		Sulphur (?)	16
		Selenium (?)	
		Sulpho-cyanogen	

4

LLEIS DE FARADAY I EVOLUCIÓ DE L'ELECTROQUÍMICA

Quina importància han tingut les lleis de Faraday en el desenvolupament de l'electroquímica? Faraday va establir les primeres lleis quantitatives de l'electròlisi, les quals podem escriure així:

1a llei: la massa d'un producte obtingut o d'un reactiu consumit durant una reacció en un elèctrode és proporcional a la quantitat de càrrega (intensitat de corrent $\times$ temps) que ha passat a través del circuit.

2a llei: les masses de diferents substàncies produïdes pel pas d'una mateixa quantitat d'electricitat són directament proporcionals als seus equivalents gram.

S'entén com a *equivalent gram* els grams de substància (molècula, àtom o ió) capaços de cedir o d'acceptar un mol d'electrons.

Aquestes lleis permeten calcular les quantitats d'electricitat o càrrega necessàries per obtenir masses determinades de substàncies mitjançant processos d'electròlisi o quantitats d'electricitat produïdes per reaccions espontànies amb bescanvi d'electrons.

També va proposar una nomenclatura que ha arribat fins ara: *electròlisi* per a la 'transformació de substàncies com a conseqüència del pas d'un corrent elèctric'; *electròlit*, la 'dissolució conductora transportadora de corrent'; *elèctrodes*, les 'plaques o varetes metàl·liques introduïdes a la dissolució'; *ànode*, l'"elèctrode positiu"; *càtode*, l'"elèctrode negatiu"; *ions*, les 'càrregues en moviment a través de la dissolució'; *anions*, els 'ions que en una electròlisi es mouen cap a l'ànode', i *cations*, els 'ions que es mouen cap al càtode'.

Els processos d'electròlisi són la base de moltes reaccions de síntesi industrial de productes emprats per a aplicacions molt diferents. De la fabricació d'alumini a la producció d'hidrogen per a usar-lo com a combustible, passant per la cloració d'aigües. En qualsevol dels casos, les lleis de Faraday ens permeten calcular les quantitats de productes generats per electròlisi a partir de la càrrega elèctrica que ha circulat. El refinament electrolític de metalls o la formació de dipòsits electrolítics són d'altres exemples de processos d'electròlisi.

El primer gran procés industrial desenvolupat aprofitant processos d'electròlisi va ser, el 1886, la fabricació d'alumini. Paul Héroult i Charles M. Hall, de manera independent i basant-se ambdós en els experiments i les teories de Michael Faraday, van utilitzar l'electròlisi per obtenir alumini metàl·lic a partir d'una dissolució d'òxid d'alumini en criolita fosa. El 1890 es va desenvolupar el mètode de Castner-Kellner per a la fabricació d'hidròxid de sodi.

Però també, no gaire més tard que els treballs de Faraday, William Grove (1842) va proposar que la descomposició electroquímica de l'aigua podia invertir-se, i obtenir-se energia elèctrica a partir de la combinació d'hidrogen i oxigen, la qual cosa va ser el primer pas per al desenvolupament de les piles de combustible, tan prometedores actualment com a sistemes generadors d'energia, i les quals es van

començar a utilitzar en les càpsules espacials Gemini i Apol·lo. Grove també va dissenyar una bateria d'àcid nítric en platí que es va utilitzar durant els anys 1840-1860 al telègraf americà.

Des de la meitat del segle XIX es va mostrar molt interès en la millora de piles i bateries i es van emprar diferents materials d'elèctrodes i varietat de dissolucions electrolítiques. Actualment, entre els sistemes electroquímics d'emmagatzematge d'energia més importants cal destacar les bateries d'estat sòlid, les piles de combustible i les cel·les de flux.

Durant el segle XX, els mètodes electroquímics es van anar introduint, primer en la síntesi de precursors de determinats productes farmacèutics i perfums i més tard en la producció a gran escala de productes finals. Així, ja el 1937 es va construir una planta per a la manufactura de sorbitol i mannitol a partir de la reducció de glucosa. També a partir de llavors es van començar a desenvolupar mètodes d'electrosíntesi orgànica de diferents tipus de compostos, des d'adiponitril, emprat com a precursor de monòmer per a la síntesi del niló 66, fins a l'àcid succínic, emprat com a additiu alimentari o en medicina, o la sacarina.

Els processos d'electròlisi ens han permès, durant molt de temps, la producció de diferents tipus de materials o compostos. Però l'evolució constant de la ciència i la tecnologia com a conseqüència de l'esforç de professionals, investigadors i institucions, ha anat desenvolupant nous processos de síntesi electroquímica aplicats a camps molt diferents. Actualment, podem anomenar una gran quantitat de processos electroquímics industrials com són la producció d'alumini, liti, sodi..., de clor i hidròxid de sodi, de clorats i compostos orgànics perfluorats, els recobriments electrolítics (electrodipòsits), el refinat de metalls, les anoditzacions, la síntesi de productes farmacèutics, de

polímers conductors per a pantalles planes, de catalitzadors per a piles de combustible, de pel·lícules semiconductores per a cel·les solars, de materials per a emmagatzematge i lectura d'informació, la fabricació d'oxigen per a submarins nuclears o naus espacials, la fabricació d'hidrogen com a combustible, etc. També les tècniques electroquímiques han contribuït al processat sostenible. Per exemple, en l'eliminació de metalls en efluents que contenen ions metàl·lics o en processos de mineralització de compostos orgànics dissolts en aigües emprant mètodes electroquímics d'oxidació avançada. En la mateixa línia, l'electrodialisi permet la dessalinització d'aigües i l'electrocoagulació i l'electroflotació són també mètodes electroquímics per al tractament de diferents tipus d'aigües.

En tots aquests processos de síntesi electroquímica, les lleis de Faraday continuen demostrant la seva validesa.

5

CIENTÍFICS RELLEVANTS QUE HAN CONTRIBUÏT AL DESENVOLUPAMENT DE L'ELECTROQUÍMICA

Científics que van desenvolupar experiments amb electricitat, fonamentals per a la realització i comprensió dels experiments electroquímics:

- William Gilbert (1544-1603), britànic: va descobrir el magnetisme produït com a conseqüència de la circulació d'un corrent elèctric.
- Otto von Guericke (1602-1686), alemany: va construir el primer generador d'electricitat a Alemanya.
- Charles François de Cisternay du Fay (1698-1739), francès: va establir que l'electricitat tenia dos signes, positiu i negatiu, i va proposar que estava constituïda per dos tipus de fluids, positiu i negatiu.
- Benjamin Franklin (1706-1790), nord-americà: va contradir la proposta de Cisternay du Fay, afirmant que l'electricitat corresponia a un únic tipus de fluid.

- Henry Cavendish (1731-1810), britànic: va proposar la llei de l'atracció entre càrregues elèctriques i va utilitzar el concepte de *potencial elèctric*.
- Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), francès: va dictar la llei de l'atracció i la repulsió electrostàtica el 1781. En honor seu, la unitat de càrrega elèctrica es denomina *coulomb*.
- Luigi Galvani (1737-1798), italià: va proposar que els teixits animals tenien una força vital (electricitat animal) que activa-va músculs i nervis quan es tocaven amb un metall.
- Jean Baptiste Biot (1774-1862), francès: va estudiar la relació entre el camp magnètic i l'electricitat.
- André-Marie Ampère (1775-1836), francès: va inventar el telègraf elèctric i l'electroimant i va formular la teoria de l'electromagnetisme. En honor seu, la unitat d'intensitat de corrent s'anomena *ampere*.
- Jean-Daniel Colladon (1802-1893), suís: va treballar en electricitat, com a col·laborador d'Ampère.

Científics destacats en el camp de l'electroquímica:

- Alessandro Volta (1745-1827), italià: va dissenyar la pila voltaica, amb discos de coure i zinc separats per peces de roba amarrades en salmorra. En honor seu, la unitat de potencial elèctric s'anomena *volt*.
- William Cruickshank (?-1810), escocès: va dissenyar, el 1802, una bateria millorada respecte a la de volta, amb distribució horitzontal de les plaques.
- Nicolas Maurice Chompré (1750-1825), francès: va ser l'autor de memòries sobre el galvanisme.
- William Nicholson (1753-1815), britànic: va observar que, en

- caure casualment una gota d'aigua sobre les connexions d'una pila voltaica, es formaven bombolles de gas.
- William Hyde Wollaston (1776-1828), britànic: va perfeccionar la pila ideada per Alessandro Volta.
 - John Wilhelm Ritter (1776-1810), alemany: va comprovar el despreniment de bombolles d'hidrogen i oxigen en introduir en aigua els terminals d'una pila.
 - Humphry Davy (1778-1829), britànic: va descompondre algunes substàncies en els seus elements fent circular corrent sobre sals foses i emprant piles recentment dissenyades.
 - Theodor von Grotthuss (1785-1822), alemany: va fer els primers experiments de descomposició electroquímica de l'aigua i va proposar el mecanisme de transport de càrrega en aigua.
 - John Frederic Daniell (1790-1845), britànic: va dissenyar, el 1836, una pila (pila Daniell) sense despreniment d'hidrogen, amb zinc i coure en contacte amb dissolucions d'ions zinc i coure, respectivament.
 - Michael Faraday (1791-1867), britànic: va sistematitzar els experiments de descomposició química i va establir les seves lleis generals (Lleis de Faraday). En honor seu, la relació entre la càrrega que ha circulat i la massa de substància transformada es coneix com a *constant de Faraday*.
 - Auguste Arthur de la Rive (1801-1873), suís: va estudiar la relació entre l'electricitat produïda per una pila i la descàrrega elèctrica en gasos.
 - William Robert Grove (1811-1896), gal·lès: va desenvolupar, el 1842, la primera cel·la de combustible (bateria voltaica de gas), capaç de produir energia elèctrica combinant hidrogen i oxigen.

- Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), alemany: va ser el primer a estudiar la distribució d'ions en la zona propera als elèctrodes carregats, i va proposar l'existència d'una doble capa electroquímica, anomenada *capa de Helmholtz*.
- Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), alemany: va observar el moviment d'ions en dissolució, amb diferent velocitat, sota l'acció d'un camp elèctric, i va introduir el concepte de *índex de transport*.
- Georges Leclanché (1839-1882), francès: va dissenyar, el 1868, la primera pila elèctrica que es va fabricar en sèrie, menys voluminosa que les dissenyades anteriorment, que va ser l'antecedent de la pila més emprada en la història, la pila zinc-carboni. La pila dissenyada per Leclanché es va utilitzar en telègrafs i ferrocarrils.
- Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932), premi Nobel de Química 1909, letó: va formular, l'any 1894, la llei d'Ostwald, que regeix els fenòmens de dissociació en dissolucions d'electròlits.
- Louis Georges Gouy (1854-1926), francès: amb David Leonard Chapman, va contribuir a la descripció de la doble capa electroquímica establerta al voltant d'un elèctrode carregat (model de Gouy-Chapman, 1913).
- Svante August Arrhenius (1859-1927), premi Nobel de Química 1903, suec: va introduir el concepte de *grau de dissociació d'electròlits* i va enunciar, l'any 1884, la seva llei de dissociació electrolítica mitjançant una tècnica de conductivitat.
- Julius Tafel (1862-1918), suís: va ser l'autor del que s'anomena *lleï de Tafel*, la qual relaciona les velocitats de les reaccions electroquímiques amb el sobrepotencial.

- Paul (Louis-Toussaint) Hérault (1863-1914), francès: va ser l'inventor de la síntesi electroquímica (electròlisi) de l'alumini metàl·lic.
- Charles Martin Hall (1863-1914), nord-americà: va descobrir, l'any 1886, el mètode electroquímic de produir alumini, de manera simultània, però independent, a Paul (Louis-Toussaint) Hérault.
- Walther Hermann Nernst (1864-1941), premi Nobel de Química 1920, alemany: va desenvolupar la teoria de la força electromotriu de les piles voltaïques, l'any 1888, i va establir l'equació de Nernst.
- Robert Andrews Millikan (1868-1953), premi Nobel de Física 1923, nord-americà: va determinar el valor de la càrrega de l'electró mitjançant l'experiment de la gota de Millikan.
- David Leonard Chapman (1869-1958), britànic: amb Louis Georges Gouy, va contribuir a la descripció de la doble capa electroquímica establerta al voltant d'un elèctrode carregat (model de Gouy-Chapman, 1913).
- Thomas Martin Lowry (1874-1936), britànic: va introduir, amb Johannes Nicolaus Brønsted, la teoria d'àcids i bases emprant cel·les electroquímiques (1923).
- Johannes Nicolaus Brønsted (1879-1947), danès: va introduir, amb Thomas Martin Lowry, la teoria d'àcids i bases emprant cel·les electroquímiques (1923), i l'escala de pH es va basar en els seus treballs.
- Niels Janniksen Bjerrum (1879-1958), danès: va definir i determinar la manera de calcular la *longitud de Bjerrum*, entenent com a tal la distància a la qual la interacció electrostàtica entre dues càrregues elementals és comparable a l'energia tèrmica.

- Petrus (Peter) Josephus Wilhelmus Debye o Petrus Josephus Wilhelmus Debije (1884-1966), premi Nobel de Química 1936, holandès, encara que va treballar als Estats Units: va millorar, juntament amb Hückel, la teoria d'Arrhenius de la conductivitat en dissolucions electrolítiques (teoria de Debye-Hückel, 1923).
- Max Volmer (1885-1965), alemany: va fer contribucions importants a la cinètica electròdica: va ampliar els resultats de Butler i va contribuir a proposar el que es coneix per *equació de Butler-Volmer*.
- Ulrich Richardson Evans (1889-1980), britànic: estudiós de la cinètica de corrosió, va dissenyar unes representacions potencial-logaritme de la intensitat (diagrames d'Evans) per descriure els processos de corrosió.
- John Alfred Valentine Butler (1889-1977), britànic: va contribuir activament al desenvolupament de la cinètica electròdica. Amb Max Volmer va proposar l'equació que es coneix per *equació de Butler-Volmer*, una de les més fonamentals de la cinètica electròdica (mostra la relació entre densitat de corrent i potencial).
- Jaroslav Heyrovský (1890-1967), premi Nobel de Química 1959, txec: va dissenyar el polarògraf, equip automàtic de registre de corbes intensitat-potencial en elèctrodes de gotes de mercuri, amb la qual cosa va crear la tècnica electroquímica d'anàlisi anomenada *polarografia* (1922).
- Erich Armand Arthur Joseph Hückel (1896-1980), alemany: coautor de la teoria de Debye-Hückel per a la descripció de la conductivitat de dissolucions d'electròlits, quan va treballar com a ajudant de Josephus Wilhelmus Debye a Zuric.

- Arne Wilhelm Kaurin Tiselius (1902-1971), premi Nobel de Química 1948, suec: va desenvolupar, l'any 1937, el primer equip sofisticat d'electroforesi, amb el qual va treballar fent electroforesi de proteïnes.
- Marcel Pourbaix (1904-1998), belga nascut a Rússia: va estudiar el fenomen de la corrosió i va dissenyar els diagrames potencial-pH (*diagrames de Pourbaix*), en els quals es visualitzen les zones d'equilibri estable en les fases d'un sistema electroquímic aquós.
- Dionýz Ilkovič (1907-1980), eslovac: va estudiar les lleis de la intensitat enregistrada a la polarografia i va definir l'equació que relaciona la intensitat límit amb la concentració de l'espècie electroactiva.
- John Edward Brough Randles (1912-1998), britànic: va fer contribucions importants al suport teòric de la voltametria cíclica (l'equació de Randles-Sevcik per descriure la influència de la velocitat d'escombratge sobre la intensitat de pic) i l'espectroscòpia d'impedància electroquímica (circuit equivalents de Randles).
- Veniamin (Benjamin) Grigorievich Levich (1917-1987), nord-americà: va desenvolupar la química i la física hidrodinàmica. L'*equació de Levich* descriu el corrent sobre un elèctrode de disc rotatori (RDE).
- Heinz Gerischer (1919-1994), alemany: es va dedicar a la cinètica electròdica i va desenvolupar instruments i tècniques per al seu estudi. Va dissenyar el potenciòstat, l'instrument més àmpliament utilitzat pels electroquímics.
- Rudolph Arthur Marcus (1923-), premi Nobel de Química 1992, nord-americà: va formular una teoria sobre les reaccions

de transferència electrònica en sistemes químics (*teoria de Marcus*).

- John O'Mara Bockris (1923-2013), sud-africà, encara que va treballar als Estats Units: va ser un investigador i divulgador en els camps de l'electroquímica física, bioelectroquímica, fotoelectroquímica i electroquímica quàntica.
- Brian Evans Conway (1927-2005), britànic, encara que va treballar al Canadà: va contribuir al coneixement de la cinètica electrònica, particularment de l'evolució de l'hidrogen i de les primeres etapes de l'oxidació de metalls.
- Revaz Dogonadze (1931-1985), rus: va ser un dels fundadors de l'electroquímica quàntica i el primer a veure un procés de transferència electrònica com una transició quàntica entre dos estats electrònics separats.

Societats històriques destacades en l'àmbit de l'electroquímica:

- American Electrochemical Society: va néixer el 1902 als Estats Units. L'any 1930 va canviar el nom per The Electrochemical Society (ECS). Va ser una organització educativa centrada en l'electroquímica i la ciència i tecnologia de l'estat sòlid.
- International Society of Electrochemistry (ISE): va néixer l'any 1949, gràcies a l'impuls d'electroquímics europeus i nord-americans, per potenciar el creixement de l'electroquímica. Té la seu a Suïssa i actualment té membres de més de setanta països.

6

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- BOWERS, Brian. *Michael Faraday and the modern world*. Essex: EPA Press, 1991.
- CANTOR, Geoffrey; GOODING, David; JAMES, Frank A. J. L. *Faraday*. Madrid: Alianza Editorial, 1994.
- DÍAZ-HELLÍN, José Antonio. *El gran cambio en la física. Faraday*. Madrid: Nivola, 2001.
- EHL, Rosemary Gene. «Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights». *Journal of Chemical Education*, 31 (1954), p. 226.
- FARADAY, Michael. *Experimental Researches in Electricity*. Londres: J. M. Dent & Sons, 1922.
- *La historia química de una vela*. Madrid: Nivola, 2013.
- GOODING, David; JAMES, Frank A. J. L. (ed.). *Michael Faraday: A Biography*. Londres: Macmillan, 1989.
- PARRA CASTILLO, Sergio. *Faraday. La inducción electromagnética*. Madrid: RBA Coleccionables, 2012.

- STRONG, F. C. «Faraday's laws in one equation». *Journal of Chemical Education*, 38 (1961), p. 98.
- THOMPSON, Sylvanus P. *Michael Faraday, his life and work* [en línia]. 1901. <<https://archive.org/details/cu31924015746096>>. [Hi col·labora la Universitat Cornell]
- TYNDALL, John. *Faraday as a discoverer* [en línia]. 1868. <<http://www.gutenberg.org/ebooks/1225>>. [Llibre electrònic, Projecte Gutenberg]

Clàssics de la Química

Títols publicats

- 1 Gilbert N. LEWIS, *L'àtom i la molècula* (2004)
- 2 Dmitri Ivànovitx MENDELÉIEV, *La relació entre les propietats dels elements i llur pes atòmic* (2005)
- 3 Jacobus Henricus van 't HOFF i Joseph Achille LE BEL, *Els àtoms en l'espai* (2007)
- 4 Dmitri Ivànovitx MENDELÉIEV, *La regularitat periòdica dels elements químics* (2008)
- 5 Edward FRANKLAND, *Sobre una nova sèrie de compostos orgànics que contenen metalls* (2010)
- 6 Amedeo AVOGADRO, *Assaig sobre una manera de determinar les masses relatives de les molècules elementals dels cossos, així com de les proporcions amb què entren en aquests compostos* (2012)
- 7 Enric MOLES, *Determinació de pesos moleculars de gasos pel mètode de les densitats límit* (2013)
- 8 Michael FARADAY, *Sobre la descomposició electroquímica* (2014)

Michael Faraday és el millor exemple de superació personal com a resultat de la seva devoció per la ciència. Sense gaires estudis, però amb una extraordinària curiositat científica, la seva tenacitat el va portar des de la feina d'ajudant de llibreter fins a membre destacat de la comunitat científica dins de la Royal Institution de Londres. Experimentador infatigable i divulgador entusiasta, va presentar la seva recerca de manera peculiar, i va arribar a escriure milers de pàgines sobre els seus experiments, pàgines que no incloïen equacions matemàtiques i que podien ser enteses amb relativa facilitat. La majoria dels seus resultats estan recollits com a conjunt de notes. Va fonamentar les bases del motor elèctric, va realitzar el primer estudi rigorós sobre la líquefacció de gasos, va descriure les diferents formes d'inducció magnètica, va postular les lleis de l'electròlisi, va descobrir el diamagnetisme i va identificar les línies de força magnètiques.

Des de 1831 fins a 1838 va recollir, en una sèrie de notes, numerades des de la 1 fins a la 1748, els resultats i les conclusions dels seus experiments relacionats amb l'electricitat (*Experimental Researches in Electricity*). Aquests resultats es van presentar cronològicament, i alguns estan relacionats amb els efectes del pas d'electricitat per produir transformacions químiques, que condueixen a la generalització de resultats que coneixem actualment com a *lleis de Faraday de l'electròlisi*. Les principals conclusions en aquesta línia es reuneixen en cent trenta-cinc pàgines, corresponents a quatre conferències de la mateixa sèrie i recollides a *Philosophical Transactions*.

Encara que la primera electròlisi de l'aigua la va realitzar el químic anglès William Nicholson, poc després que Volta inventés la pila, va ser Michael Faraday qui va estudiar i generalitzar els resultats de molts processos electrolítics, i amb això va donar un pas fonamental en l'aparició d'un nou camp dins de la química: l'electroquímica.

