

Institut

ELS premis Nobel

d'Estudis

PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
21 / 2004

de l'any 2003

Cicle de conferències

Catalans

**PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
21 / 2004**



Els premis Nobel

PUBLICACIONS

DE LA

PRESIDÈNCIA

21 / 2004

de l'any 2003

Cicle de conferències

Disseny gràfic: Enric Satué

© dels autors de les conferències
© 2004 Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició
Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: desembre de 2004
Tiratge: 450 exemplars

Text revisat lingüísticament per l'Oficina de Correcció i Assessorament
Lingüístics de l'IEC

Compost per fotocomposició gama, sl
Carrer d'Arístides Maillol, 9-11. 08028 Barcelona

Imprès a Limpergraf, SL
Polígon industrial Can Salvatella. Carrer de Mogoda, 29-31.
08210 Barberà del Vallès

ISBN: 84-7283-775-0
Dipòsit Legal: B. 51754-2004

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 reprografia 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

ÍNDEX

Introducció

7

Sobre el Premi Nobel de Literatura concedit a
John Maxwell Coetzee,
a càrrec de Brian Worsfold

11

Sobre el Premi Nobel d'Economia concedit a
Robert F. Engle i Clive W. J. Granger,
a càrrec de Màxim Borrell

33

Sobre el Premi Nobel de Química concedit a
Peter Agre i Roderick MacKinnon,
a càrrec d'Antonio Ferrer-Montiel

47

Sobre el Premi Nobel de Física concedit a
Aleksi A. Abrikosov, Vitali L. Ginzburg i Anthony J. Leggett,
a càrrec de Josep Fontcuberta i Xavier Obradors

61

Sobre el Premi Nobel de Medicina concedit a
Paul C. Lauterbur i Peter Mansfield,
a càrrec de Jaume Gili

93



Els premis anuals de la Fundació Nobel foren atorgats per primera vegada l'any 1901, i des de llavors han aconseguit la consideració de fites molt estretament lligades al desenvolupament històric de la ciència, de la creació literària i probablement de la política del segle xx. Fou el 10 de desembre d'aquell any (l'aniversari de la mort d'Alfred Nobel) que s'atorgaren a Estocolm els primers premis de Física, de Química, de Medicina i de Literatura, i a Cristiania (actualment Oslo), el de la Pau. El 1969, gràcies a una subvenció del Banc de Suècia, s'instituí i s'atorgà el premi d'Economia (de Ciències Econòmiques). L'any 1905, en què la unió política entre Suècia i Noruega va ser dissolta i aquesta darrera va esdevenir un estat independent, s'acordà que el Comitè del Nobel de Storting (del Parlament noruec) concedís el Premi Nobel de la Pau. Els premis de Química, Física i Ciències Econòmiques són seleccionats per l'Acadèmia Sueca de Ciències; el de Literatura, per l'Acadèmia Sueca, i el de Medicina, per l'Institut Karolinska d'Estocolm. L'acte oficial de lliurament dels premis tingué lloc, fins al 1925, a la Reial Acadèmia de Música, a Estocolm, i després s'ha celebrat habitualment al Concert Hall de la ciutat. El Nobel de la Pau es lliurà durant molts anys a l'Institut Nobel; des de 1947, a l'Auditori de la Universitat d'Oslo, entre els famosos frescos d'Edward Munch, i, a partir de 1990, la cerimònia té lloc al Saló de l'Ajuntament d'Oslo.

Després de cent anys d'existència, els premis Nobel han esdevingut un referent per al món acadèmic, per a la col·lectivitat científica i, en general, per al món de la cultura. L'atorgament dels premis Nobel és ara també un esdeveniment social i polític que interessa pel prestigi de les institucions vinculades amb els guardonats i pels països que representen. Però, sens dubte, més que a l'interès per la competició que susciten els mitjans de comunicació contemporanis, la curiositat que desvetlla en la societat la concessió dels premis Nobel obeeix a la realitat inqüestionable que el desenvolupament científic i tecnològic ocupa cada vegada més l'atenció de les societats avançades i la de les que ho volen ser.

L'Institut d'Estudis Catalans va tenir l'encert, l'any 1999, d'organitzar un cicle de conferències per tractar dels científics i

creadors premiats amb els Nobel, que ha continuat anualment des de llavors, amb la col·laboració imprescindible i molt estimable de la Societat Catalana d'Economia, la Societat Catalana de Biologia, la Societat Catalana de Física, la Societat Catalana de Llengua i Literatura i la Societat Catalana de Química. L'Institut, així, al mateix temps que honora els guardonats, ofereix al públic interessat les informacions apropiades més significatives per enriquir les que ens arriben habitualment a través dels mitjans generals de comunicació, més parcials o limitades, i aprofundeix en el contingut dels treballs dels premiats, n'avalua el pes en els diversos àmbits específics de la ciència o de la creació, subratlla la relació de les noves troballes premiades amb els seus antecedents històrics —a vegades premiats també en anys anteriors—, o en el context de treballs d'altres recercadors eminents, insta a reflexionar sobre la significació dels treballs guardonats per a la ciència en general i, també, potser a especular raonablement sobre les seves conseqüències per al futur del desenvolupament científic, cultural i de tot ordre.

En aquest sentit, en les conferències corresponents als Nobel d'aquest any 2003 trobem informacions, dades interessants, curiositats i elements d'especial significació que estic segur que interessaran el lector, com per exemple, les observacions referents a les relacions interpersonals entre els científics i les conseqüències positives o negatives sobre la tasca investigadora i el seu reconeixement, el valor de la tossuderia o la persistència dels bons investigadors en les noves i bones idees (Abrikosov: l'estat mixt i la xarxa de vòrtexs) i les implicacions dels treballs premiats sobre la ciència en el món i els seus efectes sobre els científics del nostre país. També cal destacar la polèmica creada per la no-concessió del premi a R. V. Damadian, que contribuí decisivament a la tecnologia guardonada amb el Nobel de Medicina i les extraordinàries i molt espectaculars aplicacions mèdiques actualment usades en el diagnòstic clínic. Especial interès té també, per subratllar la interdisciplinarietat de les ciències en certs camps, el fet que aquest any els guardonats amb el Nobel de Química han estat dos investigadors formats com a metges, i posteriorment dedicats a la recerca

biològica bàsica. També cal esmentar la troballa casual de Peter Agre d'una proteïna contaminant en un estudi sobre un factor proteic d'identificació immunològica i que la insistència i perspicàcia d'aquest investigador premiat aconseguí aclarir i identificar com la proteïna de la membrana cel·lular que constitueix el canal per al transport de les molècules d'aigua, de gran importància fisiològica. Per altra banda, la utilització de models matemàtics complexos destinats a ser capaços de «simular el futur» en lloc d'«imitar el passat, disfressant-lo de futur» ha estat aquest any l'objecte del Nobel d'Economia, llargament comentat per Màxim Borrell.

Mentre que les peripècies més personals ens poden semblar allunyades de la realitat de la producció dels autors científics, encara que de fet no ho són gens, a tots ens sembla obvi que la biografia dels autors literaris està estretament lligada amb la seva obra. La descripció de Worsfold tan detallada de les circumstàncies que envolten Coetzee, especialment durant el seu període familiar i juvenil, el paisatge en què va créixer, el context social i polític tan especial, i la seva formació i especialització professional documenten, il·lustren i orienten la percepció que tenim de l'obra tan original d'aquest autor, considerat genial per molts, i que aquest any ha estat guardonat.

FRANCESC GONZÁLEZ SASTRE
Secretari científic



**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2003
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE LITERATURA
CONCEDIT A
JOHN MAXWELL COETZEE,
A CÀRREC DE
BRIAN WORSFOLD,
DE LA UNIVERSITAT
DE LLEIDA**

**L'ART CIENTÍFIC DE J. M. COETZEE (1940),
PREMI NOBEL DE LITERATURA, 2003**

INTRODUCCIÓ

Quan parlem de J. M. Coetzee, normalment agrupem el seu nom amb el d'uns altres dos escriptors sud-africans, Nadine Gordimer i André Brink. Aquests tres autors són els més coneguts i més llegits d'entre els que han articulats una percepció de la població blanca del sistema racista a l'Àfrica del Sud. Les seves aportacions al discurs del racisme van contribuir al desmantellament del sistema de l'apartheid en el seu propi país, i això és quelcom que no es pot desestimar.

Dos d'aquests autors han guanyat ja el Premi Nobel de Literatura —Nadine Gordimer l'any 1991 i, aquest any, J. M. Coetzee. Sens dubte, Nadine Gordimer i J. M. Coetzee han estat guardonats amb els premis Nobel en part per la contribució que les seves obres literàries han fet al discurs antiapartheid. La seva obra ha ajudat a conscienciar el món sencer de la maldat que l'apartheid enclou. Així, doncs, les seves aportacions són a la vegada literàries i polítiques. Això, però, no vol dir que no es valori l'art creatiu dels autors i el valor literari dels seus texts. Les grans obres literàries sempre són afirmacions polítiques, almenys en part. Però Gordimer i Coetzee han articulats —han textualitzats— les seves percepcions i la seva protesta implícita de maneres molt diferents. Mentre que Gordimer ha escrit explícitament sobre les relacions entre blancs i negres en el context de l'apartheid de l'Àfrica del Sud, Coetzee mai no ho ha fet. Coetzee no ha centrat la seva obra en les relacions entre personatges blancs i personatges negres, sinó que ha escrit en metàfores —al·legories, paràboles, faules i llegendes— que simbolitzen i representen la condició humana en el context racista, sense especificar mai explícitament el significat central de les seves narracions. Òbviament, les seves narratives contenen personatges blancs i personatges negres, però no són caracteritzats pel fet de ser blancs o negres. El seu lloc dintre el text es correspon amb el paper que tenen dintre la narració; és a dir, Coetzee no escriu sobre les confrontacions o les relacions entre blancs i negres,

sinó que escriu contes que representen personatges blancs i personatges negres. Com diu el crític francès André Viola (1999, p. 15),¹

[...] à l'inverse de Brink, Breytenbach, ou Nadine Gordimer, il [Coetzee] ne prend jamais publiquement la parole sur la situation en Afrique du Sud. [...] Il justifie son silence [...] en se disant auteur de textes qui parlent eux-mêmes et auxquels il ne veut pas se substituer.

És que Coetzee va tenir por que les seves obres fossin censurades i prohibides com va passar amb la primera novel·la d'André Brink i les obres de molts autors sud-africans negres? Va tenir por de ser empresonat o exiliat, com va passar a tants d'altres autors sud-africans durant els quaranta anys que va durar l'apartheid? Va tenir por que la població d'*afrikaners* considerés que traïa les seves arrels ètniques? No. La raó per la qual Coetzee no va escriure específicament sobre relacions entre blancs i negres en la situació de l'apartheid va ser que Coetzee podia escriure amb la mateixa efectivitat contra el racisme a l'Àfrica del Sud sense esmentar l'apartheid pel seu nom, i no li calia presentar personatges blancs com a representants de la població blanca o personatges negres com a representants de la població negra. Podia emprar la metàfora, la representació simbòlica que, com una fórmula matemàtica, podia representar d'una manera minimalista tot el que volgués dir i comunicar.

13

LA VIDA I LES OBRES DE J. M. COETZEE

John Maxwell Coetzee va néixer el 9 de febrer de 1940 a Ciutat del Cap, fill de Zacharias i de Vera Wehmeyer Coetzee. El seu pare era fill d'un granger del Karoo que criava ovelles i al mateix temps feia d'advocat en aquella mateixa regió. Malgrat que la seva família era

1. Traducció: al contrari de Brink, Breytenbach, o Nadine Gordimer, ell [Coetzee] mai no pren públicament la paraula sobre la situació a l'Àfrica del Sud. [...] Justifica el seu silenci [...] en definir-se com autor de textos que parlen per ells mateixos i que ell no vol pas substituir.

protestant, Coetzee va rebre l'educació al St. Joseph College, a Rondebosch, Ciutat del Cap, una escola catòlica romana. El 1956, Coetzee va començar els seus estudis a la Universitat de Ciutat del Cap (UCT), on va llicenciar-se en anglès l'any 1960 i en matemàtiques l'any següent. Del 1962 al 1965 va treballar com a programador d'ordinadors a Anglaterra, a Londres, a les ciutats de Cambridge i Aldemaston. El 1965 va anar als Estats Units, a la Universitat de Texas, a Austin, amb una beca Fulbright, i va quedar-s'hi com a professor. Va doctorar-se en aquella universitat l'any 1969 amb una tesi sobre Samuel Beckett. Durant els anys de 1970 i 1971 Coetzee va impartir classes a la Universitat estatal de Nova York, a Buffalo (SUNY), però quan l'any 1972 va finalitzar el seu permís de residència als Estats Units, va tornar a Sud-àfrica. Va fer classes al Departament d'Anglès de la Universitat de Ciutat del Cap, en què més endavant va ser catedràtic de Llengua anglesa i Literatura anglesa.

Coetzee va començar a escriure la seva primera novel·la, *Dusklands*, quan treballava a Buffalo, i va acabar-la quan va tornar a Sud-àfrica. *Dusklands* és una novel·la postmoderna que planteja qüestions ètniques sobre el colonialisme. Ravan Press la va publicar a Johannesburg el 1974 i va guanyar el Premi Mofolo-Plomer. A intervals regulars van aparèixer altres novel·les, com *In the heart of the country* el 1977, un estudi psicoanalític sobre la solitud de la dona i el desig interracial en un context colonial. D'aquesta novel·la se'n va fer una pel·lícula l'any 1984 amb el títol de *Dust*. El 1980 es va publicar *Waiting for the barbarians* a Londres, una metàfora que pot fer-se extensiva a totes les persones que es trobaven en una situació difícil dintre la Sud-àfrica de l'apartheid.

La primera novel·la llarga de Coetzee, *Life and times of Michael K*, va publicar-se a Londres l'any 1983. Futurista en la seva visió, l'al·legoria minimalista de l'autor preveu el final apocalíptic de l'apartheid. En el context d'una guerra civil entre races, Michael K, un home negre que pertany al grau més baix de la societat africana, lluita contra tots els contratemps i entrebanes per a poder sobreviure i se'n surt. La novel·la va guanyar el Premi Booker-McConnell del Regne Unit i el Premi Central News Agency (CNA)

de l'Àfrica del Sud. Aquesta publicació va anar seguida de *Foe* (1986), que representa un exercici literari postmodern en què torna a escriure la història de Daniel Defoe, *Robinson Crusoe*, però contada per una dona, Susan Barton. Susan Barton havia naufragat en una illa desconeguda on va romandre juntament amb un home blanc, Cruso, i un esclau negre, Divendres, fins que van ser rescatats per un vaixell anglès. Una vegada arriben a Anglaterra vol que Daniel Defoe conti la seva història. *Foe* és una novel·la experimental en la qual els discursos postmoderns, postcolonials i feministes se sobreposen en un intent de conèixer la versió de la víctima sobre els esdeveniments que narra Defoe. A *Robinson Crusoe*, Divendres no pot parlar i, per tant, no pot expressar el seu punt de vista.

El 1988 va publicar-se als Estats Units i al Regne Unit la col·lecció d'assaigs sobre Sud-àfrica presentada com una construcció europea, amb el títol *White writing. On the culture of letters in South Africa*. Aquesta publicació va anar seguida d'altres comentaris sobre temes culturals i literaris, entre els quals destaquen *Doubling the point: essays and interviews* (1992), *Giving offense: essays on censorship* (1996) i *Stranger shores: essays 1986-1999* (2001).

Amb la publicació d'*Age of iron* el 1990, Coetzee torna novament al tema de l'apartheid a Sud-àfrica, però ara d'una manera realista. La novel·la explica com Elizabeth Curren, una dona blanca que s'està morint de càncer, intenta fer amistat amb l'única persona que li queda per a poder-se relacionar, un vagabund negre. Elizabeth s'adona massa tard que l'apartheid li ha negat el més gran dels privilegis humans, el de l'amistat. *Age of iron* va guanyar el Premi Sunday Express Book of the Year al Regne Unit, i aquesta obra va anar seguida de la publicació el 1994 de *The master of Petersburg*, una altra construcció postmoderna de la tornada de Fiodor Mikhajlovic Dostojevskij a Sant Petersburg durant la creació de la seva novel·la *Els dimonis* (1871-1872).

El 1997 es va publicar *Boyhood: scenes from provincial life*, una obra autobiogràfica que descriu l'entorn familiar i narra els esdeveniments que van marcar la vida del jove Coetzee en una ciutat petita de l'oest de la província del Cap durant els anys qua-

ranta i cinquanta. Més endavant, el 1999, va publicar-se la seva vuitena novel·la, *Disgrace*, que li va fer guanyar per segona vegada el Premi Booker-McConnell. És del tot obvi que l'acció de *Disgrace* té lloc a la Sud-àfrica postapartheid i el seu enfocament és eminentment realista. Aquell mateix any va veure la llum una altra novel·la, *The lives of animals*, en què una novel·lista famosa, Elizabeth Costello, rep una invitació per a fer conferències sobre els drets dels animals. L'any 2002 es va publicar *Youth*, que narra els esforços d'un jove per escapar-se de la Sud-àfrica de l'apartheid i traslladar-se a Londres, però es troba amb el fet que la seva creativitat l'abandona. Aquell mateix any, Coetzee va emigrar a Austràlia. Aquest 2003, Coetzee ha publicat la seva obra més recent, *Elizabeth Costello*, en la qual incorpora *The lives of animals*.

J. M. COETZEE, L'ESCRITOR

16

J. M. Coetzee és primordialment un home del desert, específicament del Petit Karoo. Els seus pares tenien una estreta relació amb el Karoo. Això és pertinent perquè al desert hi ha les planícies, el cel blau i l'horitzó; la resta és imaginació, una construcció mental pròpia, en una paraula, metàfora. És un lloc important en la literatura perquè ja Olive Schreiner va situar la seva famosa novel·la *The story of an african farm* (1883) al mateix Karoo —la granja on les tres protagonistes de l'obra de Schreiner passen la seva joventut es troba al Karoo, l'any 1860; de fet, no sabem exactament quant de temps el jove Coetzee va passar al Karoo. Com ja s'ha dit anteriorment, el seu avi era granger i hi criava ovelles i a *Boyhood: scenes from a provincial life*, Coetzee presenta la seva pròpia joventut, viscuda en la petita ciutat de Worcester, a la vora del Petit Karoo. Però les seves obres literàries revelen l'impacte que el desert deixa en la ment de l'autor. El bell mig del desert és l'escenari de l'obra *In the heart of the country*, on l'acció psicològica transcorre en una granja aïllada en el *veld*, de *Waiting for the barbarians*, on el protagonista és el jutge estatal d'una ciutat fronterera que voreja les terres dels bàrbars en un país anònim, de *Life and times of Michael K*, que narra la supervivència d'un

home negre en el mateix Karoo, i de *Disgrace*, obra en què el catedràtic blanc David Lurie es veu forçat a confrontar la nova realitat de l'Àfrica del Sud postapartheid en la granja de la seva filla Lucy situada al Cap Est, un indret fronterer, aïllat i mig desèrtic.

Coetzee usa l'espai desèrtic per a articular la seva protesta contra el racisme i la seva percepció de l'ésser humà. Coetzee és també, com s'ha esmentat, un matemàtic, matemàtic de professió, i està acostumat a encarar-se amb la pàgina blanca que cal omplir, amb el desert que s'ha de poblar, amb la taula rasa que s'ha d'emplenar amb idees, almenys amb una fórmula, una línia de símbols que representi, expliqui i signifiqui quelcom més que allò que sembla. El fet de ser matemàtic determina el procés de reflexió i l'estil literari de J. M. Coetzee —un estil més aviat sec, breu, sense retòrica, sense embelliments innecessaris, minimalista i gens barroc. Els textos de Coetzee tenen pocs adjectius, no s'hi troben descripcions llargues, els personatges estan creats a partir de pinzellades, amb colors pastel, sense massa drama, sense massa passió. El que domina els textos és el gran sentit del lloc i del detall —l'observació acurada, precisa, exacta—, l'evidència d'un gran observador del comportament humà, i sobretot hi dominen les idees. Coetzee és un escriptor sense pretensions però sincer, minimalista però seriós, amb les idees importants que contribueixen a discursos globals. És un científic que comunica i representa les seves idees i les seves opinions mitjançant la ficció.

17

LA SEXUALITAT COM A EINA D'INVESTIGACIÓ

A part del desert i l'estètica del desert, l'altra clau de l'art de J. M. Coetzee és la sexualitat. A través de la sexualitat dels seus personatges, Coetzee posa a prova les seves hipòtesis sobre diferents aspectes psicològics humans. A més, la sexualitat es posa a prova dins el marc de les lleis de l'apartheid, la de *Immorality act*, de 1927, i la del *Prohibition of mixed marriages act*, de 1949, que prohibien les relacions sexuals entre membres de diferents ètnies. A l'obra *In the heart of the country* hi ha una fusió entre el desert i la sexualitat de la Magda, una dona blanca, protagonista solitària de la no-

vel·la, que manté relacions sexuals amb el Hendrik, un home *coloured* (mestís), capatàs de la seva granja. La Magda diu a l'Anna, l'esposa del Hendrik, «Sometimes I too feel full of sorrow. I am sure it is the landscape that makes us feel like that»² (p. 114), i continua, també a la p. 114,³

What does one do with desire? My eye falls idly on objects, odd stones, pretty flowers, strange insects: I pick them up, bear them home, store them away. A man comes to Anna and comes to me: we embrace him, we hold him inside us, we are his, he is ours. I am heir to a space of natal earth which my ancestors found good and fenced about. To the spur of desire we have only one response: to capture, to enclose, to hold. But how real is our possession? The flowers turn to dust, Hendrik uncouples and leaves, the land knows nothing of fences, the stones will be here when I have crumbled away, the very food I devour passes through me.

Sota les lleis de l'apartheid, la relació de la Magda amb el Hendrik és un delictes. Conscient de la seva culpabilitat i del perill que corren, la Magda nega el seu color (p. 118):⁴

2. Traducció: «Algunes vegades jo també em sento plena de tristor. Estic segura que és el paisatge, el que ens fa sentir així.»

3. Traducció: «Què es pot fer amb el desig? Sense voler se me'n va la vista a objectes, pedres rares, flors boniques, insectes estranys: els agafo, els porto a casa, els guardo. Un home visita l'Anna i em visita a mi: l'abracem, el retenim dintre nostre, som seves i ell és nostre. Sóc l'hereva d'un espai de terra natal que els meus avantpassats van trobar bona i van encerclar amb tanques. A l'estímul del desig sols tenim una resposta, capturar, posar tanques, retenir. Però, com és de real la nostra possessió? Les flors es tornen pols, Hendrik es desacobla i se'n va, la terra no en sap res, de tanques; les pedres continuaran aquí quan jo m'hagi esmicolat, fins i tot l'aliment que devoro passa a través meu.»

4. Traducció: «Senzillament jo no sóc una dels blancs, jo sóc jo! Jo sóc jo, no un grup de gent. Per què jo he de pagar pels pecats dels altres? [...] Què més vols? He de plorar? M'he d'agenollar? Esperes que la dona blanca s'agenolli davant teu? Esperes que em converteixi en la teva esclava blanca? *Digues-m'ho! Parla!* Per què no *dius* mai res? Per què ni tan sols em dius si ho faig bé? Com ho he de saber? Com ho he d'aprendre? A qui he de demanar-ho? He de demanar-ho a l'Anna? De veritat he d'anar i demanar a la teva pròpia muller com ser dona? Com puc humiliar-me encara més?»

I am not simply one of the whites, I am *I!* I am I, not a people. Why have *I* to pay for other people's sins? [...] What more do you want? Must I weep? Must I kneel? Are you waiting for the white woman to kneel to you? Are you waiting for me to become your white slave? *Tell me! Speak!* Why do you never *say* anything? Why won't you even tell me if I do it right? How am I to know? How am I to learn? Who must I ask? Must I ask Anna? Must I really go and ask your own wife how to be a woman? How can I humiliate myself further?

A Waiting for the barbarians, el protagonista es troba en una situació similar. El magistrat, que és l'autoritat oficial d'una ciutat fortificada a la frontera amb el país dels bàrbars, manté una relació amb una noia bàrbara, coixa i parcialment cega, a conseqüència de la tortura que ha sofert a mans dels militars. El magistrat sent compassió per la noia i li dóna refugi a casa seva. Intenta guarir-la i comença a tenir-ne cura, primer de tot netejant-li els peus (p. 30).⁵

When I have washed her feet I begin to wash her legs. For this she has to stand in the basin and lean on my shoulder. My hands rub up and down her legs from ankle to knee, back and forth, squeezing, stroking, moulding. Her legs are short and sturdy, her calves strong. Sometimes my fingers run behind her knees, tracing the tendons, pressing into the hollows between them. Light as feathers they stray up the backs of her thighs.

19

5. Traducció de Xavier Rello (1988, p. 46-47): «Quan li he rentat els peus li començo a rentar les cames. Per això s'ha d'estar dreta a la palangana i repenjar-se a la meua espatlla. Les meves mans van amunt i avall de les seves cames, del turmell al genoll, pel davant i pel darrere, estrenyen, acaronen, emmotllen. Té les cames curtes i robustes, amb els panxells forts. De vegades els meus dits passen per darrere els genolls, en segueixen els tendons, entre els buits que els separen. Lleugers com plomes, es perden per darrere les cuixes.

La porto cap al llit i l'eixugo amb una tovallola calenta. Li començo a tallar i netejar les ungles dels peus; però ja em van cobrint onades de somnolència. M'adono que el cap em cau, que el cos se'm vincla cap endavant pres d'una mena d'estupor. Deixo amb compte les tisores a un costat. Després, tot vestit, m'estiro pla al seu cantó. Li abraço les cames amb força, hi bressolo el cap i m'hi adormo en un instant.

I help her to the bed and dry her with a warm towel. I begin to pare and clean her toenails; but already waves of sleepiness are running over me. I catch my head drooping, my body falling forward in a stupor. Carefully I put the scissors aside. Then, fully clothed, I lay myself down head to foot beside her. I fold her legs together in my arms, cradle my head on them, and in an instant am asleep.

Quan es troba dintre el seu territori, és a dir, l'estat de l'imperi, el Magistrat no arriba a consumir el seu amor per la noia bàrbara. Solament quan es troba fora del territori colonitzador, en les terres dels bàrbars, el Magistrat pot fer l'amor amb la noia bàrbara. Però després de l'acte sexual, el Magistrat se sent envaït per un sentiment de terror: el seu sentiment de culpabilitat és més fort que el plaer de què pugui fruir (p. 64).⁶

I am with her not for whatever raptures she may promise or yield but for other reasons, which remain obscure to me as ever. Except that it has not escaped me that in bed in the dark the marks her torturers have left upon her, the twisted feet, the half-blind eyes, are easily forgotten. Is it then the case that it is the whole woman I want, that my pleasure in her is spoiled until these marks on her are erased and she is restored to herself; or is it the case [I am not stupid, let me say these things] that it is the marks on her which drew me to her but which, to my disappointment, I find, do not go deep enough? Too much or too little: is it she I want or the traces of history her body bears?

6. Traducció de Xavier Rello (1988, p. 92-93): «No estic amb ella per cap èxtasi que em pugui prometre o proporcionar, sinó per unes altres raons que, per a mi, continuen tan fosques com sempre. Només passa que m'adono que, al llit i a les fosques, els senyals que li van deixar els seus torturadors, els peus torts, els ulls mig ceecs, s'obliden fàcilment. El cas és, doncs, que el que jo vull és la dona sencera, que el plaer amb ella se m'esguerrà mentre no s'hagin esborrat aquestes marques que té al cos i torni a ser la que era; o bé és que (no sóc pas estúpid, deixeu-m'ho dir) són els senyals allò que m'atreu cap a ella, però em decep de trobar que no són profunds? Massa o massa poc: és ella, allò que vull, o són les petges d'una història que suporta el seu cos?»

A un determinat nivell, la culpabilitat qualifica el plaer que l'opressor sent en la relació amb la seva víctima. Però el problema no és el de la víctima, sinó el problema de l'opressor mateix. Perquè és l'opressor qui percep la víctima com un objectiu de la història, un membre de l'Altre, i no pas com una persona viva i humana. *Waiting for the barbarians* és una analogia de la situació de l'Àfrica del Sud en el context de l'apartheid, on Coetzee expressa la seva profunda preocupació per l'estat psíquic dels blancs sud-africans que poden convertir-se en víctimes de la seva pròpia crueltat i manca d'humanitat envers els sud-africans negres.

A *Disgrace*, Coetzee presenta els resultats de les proposicions ja fetes en les obres *In the heart of the country* i *Waiting for the barbarians*. En els primers anys de l'era postapartheid, els blancs sud-africans es troben en una situació en la qual han perdut el poder. El protagonista de *Disgrace* és David Lurie, un home de cinquanta-dos anys, catedràtic de Romanticisme en una universitat de Ciutat del Cap, divorciat dues vegades. Quan es descobreix l'aventura amorosa entre David Lurie i una de les seves estudiantes, Melanie Isaacs, que és un noia mestissa, les autoritats universitàries l'obliguen a renunciar el seu càrrec i aleshores va a viure amb la seva filla, Lucy, que té una granja prop de Grahamstown al Cap Est. Mentre viu amb Lucy, tres homes negres ataquen la granja i, com a resultat, Lucy queda en estat. Lucy insisteix a donar llum i també a convertir-se en una esposa més de Petrus, un home negre capatàs de la granja, raonant amb el seu pare que aquesta és l'única manera de garantir la seva seguretat en la nova situació del país. Lucy també lliura la granja a Petrus, amb la condició que la deixi viure a la seva pròpia casa.

David Lurie se sent impotent per a impedir allò que ell considera una humiliació i una pèrdua total de dignitat. La masculinitat de David Lurie ha perdut tota la força, fins i tot per a ajudar la seva pròpia filla. David Lurie ha estat emasculat pel canvi de les circumstàncies, i la sola llum que Coetzee deixa entreveure en l'enfonsament dintre el túnel de la desesperació blanca és que Lucy, la pragmàtica, ha comprès que Sud-àfrica ha canviat. Al pare drí expectant no li queda cap altra opció que la de viure com un

vagabund a Grahamstown, recollir gossos morts per a cremar-los a l'incinerador i poder arribar d'aquesta manera a final de mes, tot esperant el nou membre de la família de Petrus.

La caiguda gairebé tràgica del catedràtic David Lurie és la simbolització del *disempowerment*, és a dir, la pèrdua de poder dels blancs a la Sud-àfrica postapartheid. Amb la sexualitat de David Lurie com a catalitzador, Coetzee desconstrueix sistemàticament el seu protagonista, fent-lo anar des dels «oasis de *luxe et volupté*» setmanals amb Soraya, alta i esvelta, amb la pell del color de la «mel fosca» i «els cabells llargs i morenos» i «ulls tendres» a Ciutat del Cap, fins a les sessions de relacions sexuals desenfrenades amb Bev Shaw, la dona casada encarregada de sacrificar els gossos, al terra de la clínica veterinària de Grahamstown. Fins i tot una curta visita a Ciutat del Cap no pot ajudar-lo gens ni mica a restablir d'alguna manera la dignitat que David Lurie ha perdut i que es resigna a passar la resta dels seus dies incinerant els cadàvers d'animals a Grahamstown.

Disgrace és clarament una metàfora i es pot interpretar d'una manera al·legòrica. Quan enfoca les sexualitats de David Lurie i de la seva filla Lucy, Coetzee revela el dilema, l'angoixa —*angst*— dels sud-africans blancs. Desconstrueix la masculinitat de David Lurie per a deixar al descobert la pèrdua del poder del mascle sud-africà blanc i presenta la feminitat de Lucy amb una flexibilitat suficient perquè pugui adaptar-se al nou *statu quo*. Un subtext de *Disgrace* és la «violació» dels negres sud-africans per part dels blancs sud-africans. A aquest nivell, l'aparent «violació» de Lucy per almenys un dels tres homes negres que ataquen la granja és una inversió metafòrica d'aquest subtext. Malgrat tot, Lucy mai no declara que fos en realitat violada per un dels homes negres. Encara més, es nega a avortar el fill fruit de la «violació». Aquesta és l'evidència més clara de l'adaptació de Lucy al nou *statu quo*, acceptant tàcitament les injustícies de l'opressió dels blancs sobre els negres en el passat i la decisió d'acceptar el nou ordre sud-africà en lloc de «picar ferro fred», és a dir, revelar-se contra un fet consumat. Lucy és a la vegada «violadora», com a sud-africana blanca i com a dona víctima de la violació, i la seva

decisió de tenir el fill d'un home negre és una confessió de culpa i al mateix temps una manera d'alleujar aquesta culpa. A més, conscient de la seva vulnerabilitat enmig de les noves circumstàncies, està d'acord a convertir-se en una altra de les esposes de Petrus per tal que el mosso negre la protegeixi a ella i també a la seva granja.

Malgrat l'element de tragèdia en la caiguda de David Lurie, la novel·la de Coetzee és realista, no confessional. La sexualitat de David Lurie és el catalitzador de la seva desgràcia i la llavor de la pèrdua progressiva de poder —*disempowerment*—, no sols com a home sinó també com a sud-africà blanc. La desconstrucció que Coetzee fa de David Lurie és sistemàtica i completa, sense restriccions. Fins i tot fracassen tots els esforços que David Lurie fa per acabar *Byron in Italy*, una òpera que està escrivint basada en la relació entre Lord Byron i Teresa Guiccioli, en un intent de reconstruir l'estètica cultural europea. L'autor degrada la seva creació a través d'un procés de desconstrucció, amb una advertència subliminar per a tots els homes blancs sud-africans, és a dir, aquell que no estigui disposat a adaptar-se a la nova situació està sentenciat al fracàs i a la pèrdua total de poder, o com va dir el president P. W. Botha d'una manera més contundent, cal «adaptar-se o morir». El missatge de Coetzee sembla, segons ell, l'única manera que tenen tots els sud-africans blancs per a seguir endavant és fer el que la Lucy decideix fer, acceptar la situació tal com es presenti i intentar treure'n tot el profit possible. L'altra alternativa és la d'abandonar el país.

23

J. M. COETZEE A AUSTRÀLIA

Ara J. M. Coetzee viu a Austràlia. És possible que, com el personatge de *Disgrace*, l'acadèmic David Lurie, no pogués evitar ni suportar la pèrdua de poder que com a home blanc li va arribar a l'Àfrica del Sud a l'era del postapartheid? A més, Coetzee és un *afrikaner* i no tenia l'opció de tornar a les seves arrels a la Gran Bretanya. Potser la millor opció era començar de nou en una altra antiga colònia britànica on la majoria de la població és blanca,

d'arrels europees, protestants, on no hi havia la possibilitat que la població autòctona —els aborígens— poguessin aconseguir el poder polític de l'estat. Austràlia és també desèrtica en gran part, en aquest aspecte semblant a l'Àfrica del Sud, i, en aquest punt, preferible al Canadà. Però hi havia una altra raó, que té més a veure amb la seva creativitat i amb la supervivència com a escriptor. Quan va finalitzar l'apartheid a l'Àfrica del Sud al principi de la dècada dels noranta, el discurs antiapartheid va perdre la seva *raison d'être*. Sobtadament, la textualització de sentiments antiracistes dintre el marc de l'apartheid no tenia sentit. La lluita l'han guanyat aquelles persones que van lluitar per una Àfrica del Sud lliure i democràtica. A *Disgrace*, Coetzee va articular les conseqüències psicològiques que patien els personatges blancs en la transició de l'opressió a la llibertat. Però en *The Lives of animals* (1999), obra publicada el mateix any que *Disgrace*, Coetzee articula un discurs aparentment del tot diferent, és a dir, les relacions entre *homo sapiens* i els altres animals. Però, és tan diferent? Coetzee fa una comparació entre el tractament dels jueus a mans dels seus capturadors a Treblinka durant la Segona Guerra Mundial i el tractament dels animals a mans dels éssers humans en la matança contínua en els nostres escorxadors. Elizabeth Costello, la conferenciant convidada, comenta (p. 115):⁷

To me, a philosopher who says that the distinction between human and non-human depends on whether you have a white or black skin, and a philosopher who says that the distinction between human and nonhuman depends on whether or not you know the difference between subject and a predicate, are more alike than they are unlike.

7. Traducció: «Per a mi, un filòsof que digui que la distinció entre humà i no-humà depèn de si es té una pell blanca o una pell negra, i un filòsof que digui que la distinció entre humà i no-humà depèn de si se sap o no la diferència entre un subjecte i un predicat, són més semblants que diferents.»

En altres paraules, no es pot distingir entre humans i no-humans partint de paràmetres de la invenció humana, com són el color de la pell, els sentiments, la ignorància, la consciència o el coneixement de la mort, entre altres. L'apartheid va emprar aquestes trivialitats per a sentir-se amb el dret d'oprimir quaranta milions de persones negres durant quaranta anys. De la mateixa manera, no es pot justificar la cria, el transport i la matança de milions d'animals perquè la població humana se'ls mengi. Així com l'Àfrica del Sud va ser el bressol de l'apartheid, Austràlia és una de les fàbriques de la injustícia envers els animals més important del món. Pot ser que aquesta sigui la raó per a la qual Coetzee ha elegit anar a viure a Austràlia; és la font de dades per a la seva anàlisi sistemàtica de la crueltat dels éssers humans envers els animals i el lloc on pot obtenir experiència personal i textualitzar amb autenticitat el discurs global que tracta les relacions entre l'ésser humà i els animals. Sempre cal tenir en compte que Coetzee és un home del Karoo i que el seu avi era un criador d'ovelles. Des d'aquesta perspectiva, hi ha poca diferència entre racisme i carnivorisme. El racisme és el menyspreu envers altres éssers humans, i el carnivorisme consisteix a menysprear els altres animals.

La seva novel·la més recent, *Elizabeth Costello*, és una compilació de vuit lliçons, i Coetzee hi inclou el text de *The lives of animals* com les lliçons 4 i 5. A més de la polèmica sobre la matança sistemàtica d'animals per al consum, Coetzee aborda altres discursos, com per exemple la novel·la escrita en anglès procedent de l'Àfrica. En el llibre *White writing. On the culture of letters in South Africa*, Coetzee feia una distinció entre la literatura d'escriptors africans negres i la literatura d'africans blancs, com ell. Va denominar la literatura dels escriptors de Sud-àfrica i de Zimbabwe blancs «white writing» (literatura d'africans blancs), caracteritzada per l'elevat grau de colonialitat, mentre que la literatura dels negres sud-africans i dels negres zimbabwesos té un grau molt més baix de colonialisme. Coetzee assenyala que els treballs literaris són blancs sols pel fet que sorgeixen a causa de l'interès de la gent que ja no és europea però que

tampoc encara no és africana. No obstant això, a través del personatge d'Elizabeth Costello va més enllà. La crítica és més dura. Elizabeth Costello diu a l'escriptor nigerià Emmanuel Egudu (p. 51):⁸

The English novel [...] is written in the first place by English people for English people. That is what makes it the English novel. The Russian novel is written by Russians for Russians. But the African novel is not written by Africans for Africans. African novelists may write about Africa, about African experiences, but they seem to me to be glancing over their shoulder all the time they write, at the foreigners who will read them. Whether they like it or not, they have accepted the role of interpreter, interpreting Africa to their readers: Yet how can you explore a world in all its depth if at the same time you are having to explain it to outsiders? It is like a scientist trying to give full, creative attention to his investigations while at the same time explaining what he is doing to a class of ignorant students. It is too much for one person, it can't be done, not at the deepest level. That, it seems to me, is the root of your problem. Having to perform your Africanness at the same time as you write.

Coetzee critica amb igual força els estudis de les humanitats a la universitat. Per boca de sor Bridget, la germana d'Eliza-

8. Traducció: «La novel·la anglesa [...] està escrita majoritàriament per gent anglesa per a la gent anglesa. Això és el que la fa la novel·la anglesa. La novel·la russa està escrita per russos per a gent russa. Però la novel·la africana no està escrita per africans per a gent africana. Els novel·listes africans poden escriure sobre Àfrica, sobre experiències africanes, però a mi em sembla que tot el temps que estan escrivint, miren enrere pendents dels estrangers que els llegiran. Els agradi o no, han acceptat el paper d'interès, interpretant Àfrica per als seus lectors: però, com es pot explorar un món en tota la seva profunditat si al mateix temps s'ha d'explicar als forasters? És com si un científic intentés posar tota la seva atenció creativa en les seves investigacions i alhora explicar el que està fent a una classe d'estudiants ignorants. És massa per a una persona, no es pot fer, no al nivell més profund. Em sembla que aquí és on rau el teu problema. Haver de representar el teu africanisme ensems que escrius.»

beth, i una missionera de Zululàndia, Coetsee fa la crítica de les universitats perquè «the university embraced humane studies only in the arid, narrow form. That narrowed form was textual scholarship»⁹ (p. 120). I la monja acaba el seu discurs dient (p. 123):¹⁰

The *studia humanitatis* have taken a long time to die, but now, at the end of the second millennium of our era, they are truly on their deathbed. All the more bitter should be that death, I would say, since it has been brought about by the monster enthroned by those very studies as first and animating principle of the universe: the monster of reason, mechanical reason.

Més endavant, en una carta a la seva germana, Elizabeth intenta trobar un paper per als estudis de les humanitats (p. 150-151):¹¹

In all our talk about humanism and the humanities there was a word we both skirted: *humanity*. When Mary blessed

27

9. Traducció: «la universitat va adoptar els estudis humans sols en forma àrida, reduïda. Aquesta forma restringida era l'erudició textual».

10. Traducció: «Els *studia humanitatis* han tardat molt a morir, però ara, al final del segon mil·lenni de la nostra era, es troben de veritat en el llit de mort. Diria que aquesta mort serà encara més amarga perquè l'ha causat el monstre entronitzat per aquells mateixos estudis que el consideren com el primer i el principi que anima l'univers: el monstre de la raó, la raó mecànica.»

11. Traducció: «En tota la nostra xerrada sobre humanisme i humanitats hi havia una paraula que totes dues defugíem: humanitat. Quan Maria, lloada entre les dones, somriu amb aquell somriure remot i angèlic i toca suaument el seu dolç mugró rosat davant els nostres ulls, quan jo, imitant-la, em destapo els pits per al vell senyor Phillips, estem fent actes d'humanitat. Actes com aquests no els poden fer els animals, no poden destapar-se perquè no es tapen. No hi ha res que ens obligui nosaltres a fer-ho, ni a Maria ni a mi. Però per generositat, de la generositat dels nostres cors humans, tanmateix ho fem: deixem caure els vestits, ens deixem veure tal com som, descobrim la vida i la bellesa amb la qual ens han beneït. [...]

Les humanitats ens ensenyen humanitat. Després de la llarga nit de segles cristiana, les humanitats ens tornen la nostra bellesa, la nostra bellesa humana. Això és el que t'has oblidat de dir. Això és el que els grecs ens ensenyen, Blanche, els grecs de bon cor. Pensa-hi.»

among women smiles her remote angelic smile and tips her sweet pink nipple up before our gaze, when I, imitating her, uncover my breasts for old Mr. Phillips, we perform acts of humanity. Acts like that are not available to animals, who cannot uncover themselves because they do not cover themselves. Nothing compels us to do it, Mary or me. But out of the overflow, the overflow of our human hearts we do it nevertheless: drop our robes, reveal ourselves, reveal the life and beauty we are blessed with. [...]

The humanities teach us humanity. After the centuries-long Christian night, the humanities give us back our beauty, our human beauty. That was what you forgot to say. That is what the Greeks teach us, Blanche, the right Greeks. Think about it.

En part, la novel·la *Elizabeth Costello* és un crit per a la restauració de la civilització hel·lènica com a substitut de la cristianen en el tercer mil·leni. En una discussió amb la seva germana, Elizabeth Costello diu que la imatge de la crucifixió de Jesús és «gòtica» (p. 138), i continua (p. 138-139),¹²

Why a Christ dying in contortions rather than a living Christ? A man in his prime, in his early thirties: what do you have against showing him alive, in all his living beauty? [...] The Greeks would never have made statues and paintings of a man in the extremes of agony, deformed, ugly, and then knelt before those statues and worshipped them. You ought to know, you cannot have

12. Traducció : «Per què un Crist morint-se, cargolant-se, en comptes d'un Crist vivent? Un home a la flor de la vida, amb poc més de trenta anys: què tens en contra de mostrar-lo amb vida, amb tota la seva bellesa vivent? [...] Els grecs mai no haguessin fet estàtues i pintures d'un home en una agonia extrema, deforme, lleig, per a després agenollar-se davant d'aquestes estàtues i adorar-les. Hauries de saber, no pots haver-ho oblidat, que les representacions de Jesús agonitzant són una idiosincràsia de l'Església d'Occident. Són del tot alienes a Constantinoble. L'Església d'Orient les hauria considerat indecents, i amb força raó.

[...] Per què la gent no hauria de ser capaç de mirar una obra d'art i pensar interiorment, *Això és el que com a espècie som capaços de fer, això és el que jo sóc capaç de fer*, en lloc de mirar-la i pensar interiorment, *Déu meu, em moriré, els cucs em menjaran?*»

forgotten, that representations of Jesus in his agony are an idiosyncrasy of the Western Church. They are entirely foreign to Constantinople. The Eastern Church would have regarded them as indecent, and quite right too. [...]

Why should people not be able to look at a work of art and think to themselves, *That is what we as a species are capable of being, that is what I am capable of being*, rather than looking at it and thinking to themselves, *My God, I am going to die, I am going to be eaten by worms?*

Elizabeth Costello critica específicament la difusió de la figura de Jesús crucificat per tots els països de l'Àfrica (p. 139-140).¹³

What are you doing, importing into Africa, importing into Zululand, for God's sake, this utterly alien, *Gothic* obsession with the ugliness and mortality of the human body? If you have to import Europe into Africa, is there not a better case for importing the Greeks?

Les idees són d'Elizabeth Costello, no necessàriament del seu creador.

CONCLUSIÓ

Per què l'art «científic» de J. M. Coetzee? Perquè el mètode de Coetzee és científic; Coetzee utilitza la ficció per a presentar les seves propostes. Aquestes propostes no arriben a ser afirmacions en la ficció, i el mateix autor guarda la distància entre ell i les seves propostes fins que es puguin comprovar. A *In the heart of the country*, *Waiting for the barbarians*, *Age of iron* i *Disgrace*, per exemple,

13. Traducció: «Què esteu fent, important a l'Àfrica, important a Zululàndia, per l'amor de Déu, aquesta obsessió gòtica i totalment aliena per la lleter i la mortalitat del cos humà? Si heu d'importar Europa a Àfrica, no seria millor importar els grecs?»

tracta l'estat psicològic de les persones blanques que van experimentar el racisme de l'apartheid; el tema queda exposat en les obres de Coetzee, i llavors sols queda pendent la comprovació. El mateix autor, com a bon científic, no treu conclusions sense proves, i sols el temps pot facilitar aquestes proves. Coetzee és un escriptor d'idees i suggeriments, no d'afirmacions.

J. M. Coetzee és també un escriptor per a escriptors. Quan escriu, J. M. Coetzee ho fa amb un gran sentit d'escriptor, de creador, de l'artista que pot tenir tot el control sobre el producte literari. És un autor que juga amb l'ambigüïtat i el doble significat. Així mateix, és un autor altament conscient de la textualització —de la construcció narrativa— i de l'experimentació textual. Novel·les com *Foe* i *The master of Petersburg* són clarament novel·les postmodernes, en les quals reconstrueix personatges de la història literària juntament amb els seus creadors, com Divendres i Cruso i Daniel Defoe, autor de *Robinson Crusoe* (1719-1722), en el primer, i els anarquistes de Sant Petersburg de l'any 1869 i Dostojevskij, en el segon. També és conscient que l'autor pot perdre el control de la seva ficció. En l'obra *Waiting for the barbarians* s'adona que ha perdut el control i fa que el Magistrat confessi que «there were unsettling occasions when in the middle of the sexual act I felt myself losing my way like a storyteller losing the thread of his story»¹⁴ (p. 45). Però sobretot, Coetzee reclama la llibertat d'escriure. En l'obra *The master of Petersburg*, el compositor de la impremta explica a Nechaev, líder dels joves anarquistes, «Writers have their own rules. They can't work with people looking over their shoulders.»¹⁵ (p. 198). Ara més que mai, guanyador del Premi Nobel de Literatura, J. M. Coetzee tindrà constantment gent pendent d'ell, observant tots els seus moviments. Esperem que això no afecti la seva creativitat i la seva destresa a l'hora de textualitzar les seves propostes en la ficció.

14. Traducció: «hi havia ocasions perturbadores quan enmig de l'acte sexual era com si em perdés com algú que explica contes i perd el fil de la història».

15. Traducció: «Els escriptors tenen les seves pròpies regles. No poden treballar amb gent observant tots els seus moviments.»

REFERÈNCIES

- COETZEE, J. M. *Dusklands*. Johannesburg: Ravan Press, 1974.
- *In the heart of the country*. Londres: Secker & Warburg, 1977.
- *Waiting for the barbarians*. Londres: Secker & Warburg, 1980.
- *Dusklands*. Harmondsworth: Penguin Books, 1983.
- *In the heart of the country*. Harmondsworth: Penguin Books, 1983.
- *Life and times of Michael K*. Londres: Secker & Warburg, 1983.
- *Foe*. Londres: Secker & Warburg, 1986.
- *Foe*. Harmondsworth: Penguin Books, 1987.
- *Waiting for the barbarians*. Harmondsworth: Penguin Books, 1987.
- *Esperant els bàrbars*. Barcelona: Edhasa Clàssics Moderns, 1988. [Traducció de Xavier Rello Andreu]
- *Age of iron*. Londres: Secker & Warburg, 1990.
- *Age of iron*. Harmondsworth: Penguin Books, 1991.
- *Doubling the point: essays and interviews*. Boston MA: Harvard University Press, 1992.
- *Giving offense: essays on censorship*. Chicago IL: University of Chicago Press, 1996.
- *Boyhood: scenes from provincial life*. Londres: Secker & Warburg, 1997.
- *Disgrace*. Londres: Secker & Warburg, 1999.
- *The lives of animals*. Londres: Profile Books, 1999.
- *Stranger shores: essays 1986-1999*. Londres: Secker & Warburg, 2001.
- *Youth*. Londres: Secker & Warburg, 2002.
- *Elizabeth Costello*. Londres: Secker & Warburg, 2003.
- VIOLA, André. J. M. *Coetzee. Romancier sud-africain*. París: L'Harmattan, 1999.



ELS PREMIS NOBEL

DE L'ANY 2003

SOBRE EL

PREMI NOBEL D'ECONOMIA

CONCEDIT A

ROBERT F. ENGLE

I CLIVE W. J. GRANGER,

A CÀRREC DE

MÀXIM BORRELL,

D'ESADE

LA IMPORTÀNCIA DE LES CONTRIBUCIONS D'ENGLER I GRANGER, PREMIS NOBEL D'ENQUANY (2003)

INTRODUCCIÓ

Abans de tot, desitjo manifestar el meu agraïment a les persones que han tingut la deferència de proposar-me perquè avui concorri davant de vostès, en aquesta volguda seu de l'Institut d'Estudis Catalans, dintre del cicle de conferències titulat «Els premis Nobel de l'any 2003». Amb la meua acceptació vaig assumir la responsabilitat de parlar sobre els actuals premis d'economia. I és motiu de profunda satisfacció que pugui adreçar-me a un ampli ventall de col·legues en les tasques intel·lectuals (deliberadament utilitzo la veu «col·lega» d'una manera que desborda l'àmbit etimològic).

Parlar del treball dels nostres dos acadèmics exigeix, segons em sembla, que anunciï la meua posició dient que veig el premi com un símbol per a distingir i reconèixer (deia Wittgenstein a «La certesa» que el saber es fonamenta, en darrer terme, en el reconeixement) no sols la tasca d'Engler i Granger, sinó també la d'una munió d'estudiosos que en les tres últimes dècades han dut a terme avanços rellevants en un camp del saber que està començant a independitzar-se dels contextos (en plural, com aclariré posteriorment) en els quals s'ha anat desenvolupant: em refereixo al camp de l'anàlisi de les sèries temporals (AST).

Donada la dificultat tècnica que *per se* presenta l'AST, m'ha semblat que, essent veritat allò d'Oscar Wilde —«Truth is rarely pure, and never simple»—, m'havia d'esforçar perquè, almenys, la meua exposició fos senzilla i clara; per això he pensat que procediria seguir l'ordre següent: una breu descripció del procés històric que ha conduït a l'aparició de l'AST; tot seguit, unes pinzellades biogràfiques de cadascun dels científics guardonats i unes notes indicatives de les que, al nostre parer, són les seves contribucions més importants; finalment, com a epíleg, m'agradaria que em permetessin una petita digressió sobre els aspectes ètics, sovint relegats a

un segon pla, quan no oblidats, com a conseqüència dels entusiasmes que suscita l'ús de tècniques complexes, siguin de naturalesa tangible o no.

UNA MATÈRIA D'ESTUDI: LES SÈRIES TEMPORALS

La teoria econòmica com a disciplina s'ocupa de les relacions entre els diversos agents i les variables i magnituds de naturalesa econòmica. Resulta obvi que el conjunt d'aquestes relacions és, per la seva amplària, tan immens, que resulta intel·lectualment inabastable, i això exigeix desprendre's de l'ambició de totalitat; és a dir, cal restringir-se a un grup de relacions determinat, en el qual, una vegada ben establert qualitativament, s'intenti aprofundir l'anàlisi —sobretot, a efectes no sols explicatius sinó també predictius— fent servir el mètode matemàtic, que permet expressar aquestes relacions econòmiques en forma de relacions funcionals. En un primer moment, basant-nos en els recursos de la matemàtica que podem qualificar de determinista i, més tard, utilitzant la matemàtica de la probabilitat. La incorporació de la probabilitat a l'economia va afavorir la creació d'una nova disciplina, l'econometria, de la qual van establir les bases Ragnar Frisch (per cert, el primer premi Nobel d'Economia, al 1972), Haavelmo, Klein, i Koopman, entre altres. Avui, la utilització de mètodes quantitius resulta tan imprescindible, que està començant a desaparèixer la figura de l'economista que tem més els càlculs matemàtics que el renals.

Com ja hem dit, la inacceptabilitat pràctica de l'asseveració segons la qual «tot depèn de tot» obliga a enunciar teories parcials (i, aquí, «parcial» vol tenir una doble significació semàntica: de no-totalitat i de partidisme en favor d'aquest tros de totalitat escollida, partidisme motivat per alguna raó intel·lectual i/o material), que imposin límits a una possible relació de dependència general. Això es fa a través d'hipòtesis que pretenen capturar l'essència del fenomen econòmic en si mateix, previst des d'uns certs punts de vista. I aquesta visió parcial, recollida en el grup

d'hipòtesis, es manifesta en forma d'un conjunt de restriccions que condicionen l'expressió matemàtica que adoptaran les relacions de dependència objecte d'anàlisi. S'haurà construït, així, un «model» que sol quedar molt ben especificat a excepció d'una «família de paràmetres».

El pas següent ja és tasca de l'econometria: a partir de dades procedents de la realitat econòmica, i aplicant tècniques d'estimació apropiades, s'obtenen els valors dels esmentats paràmetres. Això significa, doncs, que tenim *a*) un esquelet teòric (el model) vàlid mentre no canviï substantivament la realitat parcial recollida en les hipòtesis —per tant, el model seria aplicable a diversos entorns econòmics—, i *b*) la seva adaptació a les circumstàncies concretes de temps i lloc mitjançant la correcta especificació de la corresponent família de paràmetres.

Doncs bé, els grans progressos de l'econometria, en estret matrimoniatge amb els de la potència de càlcul, han fet créixer extraordinàriament un àmbit d'estudi que alguns anomenen «econometria de les sèries temporals», però que per una raó que donaré a continuació i ampliaré més endavant prefereixo dir-ne —almenys mentre no hi hagi consens en favor d'una expressió més encertada— «anàlisi de les sèries temporals». Potser sigui oportú dir ara —i aquesta és la raó anunciada— que, per sèrie temporal, entenem un conjunt d'observacions realitzades sobre un sistema a intervals regulars de temps; per consegüent, l'AST no sols és d'aplicació a l'economia.

En resum, podem afirmar que l'economista té l'ambició de preveure i assolir l'harmònic funcionament «sincrònic» de factors econòmics diversos i més o menys nombrosos (una espècie de rel·lotge); però amb això no n'hi ha prou: mitjançant l'econometria en general i l'AST en particular, tracta tanmateix de preveure i assolir l'harmonia «diacrònica», o sigui, l'harmonia en el decurs del temps de factors susceptibles individualment d'un desenvolupament autònom (S. Cotta). Efectivament, un sistema econòmic al qual es permetés obrar per si mateix donaria lloc al fet que aquells factors provoquessin «discronies» no desitjades per part dels qui dirigeixen el sistema. Aquesta doble ambició ens permet «simular

el futur» en lloc de limitar-se a «imitar el passat, disfressant-lo de futur», cosa que es produiria en cas de romandre dins d'un exclusiu àmbit sincrònic. L'economista pràctic, així, ja no ha d'anar gairebé a les palpentes (en versos del nostre Joan Vinyoli a *L'encanteri*, «A les palpentes // cal sempre anar vers una llum ignota, // sota les voltes de l'obscuritat»), atès que es troba més ben auxiliat per a seguir la recomanació de la filòsofa Maria Zambrano, quan deia que «la realidad nos cerca y, sin embargo, hay que buscarla».

L'origen de l'estudi de les sèries temporals és llunyà en el temps, ja que coneixem un manuscrit del segle X, tal vegada de l'XI, que té com a autor Macrobius, en el qual hi ha un comentari a l'obra *In somnium Scipionis*, de Ciceró, que utilitza un diagrama (molt posteriorment qualificat de cartesià) per a recollir les inclinacions de les òrbites planetàries en funció del temps: per a la zona zodiacal, l'eix d'abscisses es troba dividit en trenta parts iguals (regularitat observacional diària), i les seves ordenades representen l'amplària del cinturó zodiacal.

El següent pas útil per al món de les sèries temporals el constituí la geometria de Descartes o, com es va anomenar durant tant de temps, geometria analítica, imprescindible per a lligar gràfics geomètrics i l'àlgebra. En 1879, un tercer pas, el llibre *Els principis de la ciència*, de Stanley Jevons, recomanava l'ús de paper pautat amb rectes horitzontals i verticals per a capturar d'una manera més pràctica les observacions temporals que la ciència de l'època anava fent. Un pas més es fa també durant el segle XIX, amb l'avenc de la física, que suposà un impuls a la geometria analítica, aprofitat per distintes disciplines científiques, com l'astronomia, la biologia i la mateixa economia (encara que sempre des d'una perspectiva matemàtica de caràcter no probabilista). A partir d'aquí, els nous progressos obligaven a anar abandonant l'ús exclusiu dels models deterministes, començant-se l'elaboració de l'estadística matemàtica. No obstant això, no fou fins cap a la dècada dels anys vint del passat segle XX que l'evidència observacional a la natura i les fortes necessitats pràctiques pressionaren perquè es parlés de «tendències», «cicles» i d'altres patrons (*pat-*

terns) sistemàtics de comportament: ja som, doncs, dins l'àmbit no sols probabilista sinó també de l'ús de les sèries temporals. Al 1927, un dels estadístics més grans que ha existit jamai, Yule, va introduir una idea seminal que subjeu en l'anàlisi de moltes sèries temporals: en un conjunt d'observacions astronòmiques descobrí que el que semblaven canvis atribuïbles a l'atzar, o sigui, simples irregularitats en les ST dels fenòmens objecte d'estudi, presentaven en realitat unes regularitats assimilables al moviment d'un pèndol rígid oscil·lant sota l'acció gravitatòria segons un petit arc (moviment harmònic) representables mitjançant funcions sinusoidals. A més, si algú va llançant irregularment en el temps objectes lleugers contra el pèndol en moviment, per exemple, pèsols, les seves amplituds es fan irregulars i els seus períodes temporals, també. Els pèsols suposen, doncs, uns xocs que s'incorporen al moviment futur del sistema. Aquest concepte es troba a l'origen mateix de la teoria dels «processos estocàstics» (un procés estocàstic és una família de variables aleatòries associades a successius moments en el temps), el desenvolupament dels quals —i al qual contribuïren decisivament Levy i Wiener, entre d'altres— ha constituït una peça importantíssima en la moderna teoria de les ST. Els economistes manegen models ARIMA, els afeccionats a la borsa, també quan parlen del «camí aleatori», etc.; en realitat, estem parlant de processos estocàstics i també de sèries temporals.

Diferentment, en altres àrees de l'estadística, el tret característic de l'AST és que les observacions es duen a terme d'acord amb un ordre temporal, com ja hem dit, cosa que no és tan banal com pot semblar a primera vista, ja que això té una conseqüència fonamental: la relació existent entre els valors corresponents a un punt del temps i el següent, és a dir, som davant de les correlacions intra-sèrie, denominades tècnicament «correlacions serials». Però també són rellevants les correlacions enterserials, que resulten essencials per a la modelització (aquí cal esmentar els «retards temporals» o «lags»). Això es troba en estret parentiu amb la cointegració estadística, de la qual parlarem de seguida.

ELS DOS PREMIS NÓBEL I LES SEVES CONTRIBUCIONS MÉS IMPORTANTS

De bell antuvi, una pinzellada biogràfica per a després exposar les aportacions que al nostre parer són més rellevants.

Comencem amb Clive W. J. Granger: economista i estadístic britànic (nascut a Swansea, Gal·les), de seixanta-nou anys, es doctora al 1959. Des de fa molts anys treballa a la Universitat de Califòrnia, a San Diego, un centre públic. Si se'n pot dir així, en tot cas, abusant de l'ús de la comparança, més estadístic que economista; per això la relació amb l'altre premi, l'Engle, a qui va aconsellar en moments crucials de la seva carrera científica, ha estat molt complementària, ja que en aquest últim prima més el vessant d'economista que el d'estadístic; dit sigui això, també abusant de la comparança.

Robert F. Engle és dels Estats Units d'Amèrica (nascut a Siracusa, estat de Nova York), de seixanta-un any, i es doctora al 1969. Immediatament després és nomenat professor del MIT (1969 – 1974); per consell de Granger, passa a la Universitat de Califòrnia, on ha estat de 1975 a 1977, i de 1990 a 1994. Actualment és professor d'economia a la Stern School of Business, de la Universitat de Nova York, institució molt mimada per la Borsa, no per la seva proximitat física a Wall Street, sinó per la qualitat i oportunitat de la recerca que realitzen Engle i el seu equip.

La contribució més important que ha fet Granger ha estat l'anomenada «cointegració estadística» (a mitjan anys setanta), un procediment per a analitzar la relació existent entre dues variables econòmiques (riquesa i consum, per exemple), caracteritzada cadascuna a través d'una ST, que permet determinar les combinacions de ST no estacionàries que es comporten com a estacionàries. Precisament, Granger ha rebut el premi «pels mètodes que ha desenvolupat per a analitzar sèries temporals amb tendències comunes». Amb el seu mètode se superen els problemes que sorgeixen en estudiar ST no estacionàries amb mètodes propis de les ST estacionàries, que donaven peu a l'aparició de la patologia coneguda com «correlació espúria». Granger també desenvolupà el «test de

causalitat de Granger», segons s'anomena en la bibliografia, que serveix per a determinar, d'entre un conjunt de dues variables, quina de les dues influeix sobre l'altra, és a dir, serveix per a establir la relació de dependència dinàmica que les lliga. Avui, les tècniques introduïdes per Granger són emprades per macroeconomistes que han d'ocupar-se de variables com són ara ingrés, consum, nivells de preus, PIB, etc., així com pels economistes que han de fer prediccions relatives als mercats financers, els bancs centrals, els departaments ministerials de finances, etc.

El professor Engle ha treballat moltíssim amb el professor Granger (per exemple en la cointegració estadística). En efecte, es comptabilitzen un total de vint-i-set treballs signats conjuntament; un d'aquests treballs és un model economètric amb ST que serveix per a predir, referit a una determinada zona de servei, el consum diari d'energia elèctrica, segmentat per hores, i que té com a finalitat ajudar a casar, o sigui, a establir el *matching* (segons l'expressió anglesa) entre oferta i demanda per tal d'evitar desajustaments que provoquin mancances d'energia o, d'altra banda, costos no desitjats com a conseqüència d'un excés de producció d'energia. Però Engle té també un elevat nombre de recerques individuals relacionades amb les ST; així, l'Acadèmia de Ciències sueca l'ha premiat «per la seva notable contribució al desenvolupament de mètodes útils per a analitzar sèries temporals les característiques de les quals varien al llarg del temps», és a dir, pels seus treballs sobre les variables la volatilitat de les quals és funció del temps, necessaris avui dia per a efectuar l'anàlisi dels preus en els mercats financers quan aquests transiten de períodes amb fluctuacions i oscil·lacions petites a períodes de volatilitat àmplia. Anteriorment a aquests resultats, les tècniques emprades per a efectuar les esmentades anàlisis havien d'acceptar la hipòtesi de volatilitat constant, simplement perquè s'ignorava com tractar una situació molt més realista. Una aportació fonamental d'Engle és el concepte d'«heteroscedasticitat condicional autoregressiva» (1982), que ha donat lloc al desenvolupament dels anomenats models ARCH i GARCH, models avui considerats imprescindibles per a predir la volatilitat i que els analistes i grans inversors institucionals empran quan es ne-

cessita una estimació fina del risc associat a les seves carteres i, per tant, també per a fer una selecció òptima dels actius que configuraran aquestes carteres. Encara una altra innovació: ens referim al model de «duració condicional autoregressiva», o model ACD, utilitzat per certs agents dels mercats financers que operen en el *trading* (negociació) intradia per a predir l'interval de duració temporal entre dues transaccions successives, i que té com a raó última la de dissenyar unes estratègies d'actuació que optimitzin el benefici aconseguit per aquest tipus d'agents. Tanmateix, Engle ha treballat en els «models estructurals» o models UCARIMA.

He dit ja que les ST eren un eina que no restava confinada a l'econometria, i acabem d'esmentar les oscil·lacions o fluctuacions. Doncs bé, voldria ara reforçar la primera asserció fent uns petits comentaris sobre l'«anàlisi espectral». Aquest instrument, emprat avui pels econòmetres, és utilitzat des de fa molt de temps pels físics i els enginyers, i es basa en el desenvolupament de funcions segons sèries trigonomètriques, ja emprades per Bernoulli, Euler i Fourier, entre d'altres; concretament, aquest últim els usà per a integrar la denominada «equació diferencial de la calor», equació avui necessària en determinats àmbits de l'economia financera. Al voltant de 1920, el vigorós creixement de disciplines com l'acústica, la mecànica vibratòria i l'electricitat, fins aleshores desconnectades entre si, van trobar un nexa, en crear-se aleshores l'anomenada teoria de les oscil·lacions, que va fer servir massivament les representacions espectrals. Diguem per a aclarir les coses que la «representació espectral» d'una funció (també, obtenció de l'espectre d'amplituds de la funció o anàlisi espectral de la funció) és el conjunt de paràmetres multiplicatius de les funcions sinusoidals de la sèrie trigonomètrica representativa de la funció. L'anàlisi espectral és usada actualment per qualsevol persona que manegi sèries trigonomètriques i, per tant, també pels econòmetres, tal com deia; en particular, les contribucions de Granger i Engle es fonamenten en aquesta anàlisi. Desitjaria, doncs, a través d'aquests comentaris, que aquesta eina ningú no la veiés com a patrimoni de la física, l'enginyeria ni l'econometria; ans al contrari, cal veure-la avui dia com una disciplina que s'ha anat construint per les apor-

tacions realitzades en diferents àmbits i, especialment, des d'aquells que podríem dir que són «disciplina pilot», o disciplina que per la seva importància en cada moment històric té problemes que, en resoldre's sota la seva incitació, són més tard utilitzats per a solucionar problemes, estructuralment anàlegs des del punt de vista matemàtic, que es plantegen altres disciplines. Així, l'economia s'ha beneficiat històricament de l'instrumental matemàtic desenvolupat per físics i enginyers, i avui també aquests utilitzen eines aportades per economistes.

EPÍLEG: ALCUNES CONSIDERACIONS SOBRE L'ÈTICA AMB RELACIÓ A L'ÚS DE TÈCNiques

Els avantatges d'usar tècniques, teories, instruments, raonaments estructurats, etc. (per a abreviar, utilitzaré aquí, abusivament, la veu «tècniques») apropiats a la finalitat parcial (en la doble acceptió ja indicada) per a la qual foren desenvolupats són evidents i immediats, però no ho són tant els seus inconvenients, ja que aquests poden aparèixer, moltes vegades per acumulació, per ús excessiu, etc. (la coneguda relació entre quantitat i qualitat) en el decurs del temps; i si això s'esdevé amb els instruments físics (automòbils, pantalles d'ordinador, per exemple), també pot succeir amb els instruments de naturalesa conceptual abstracta, molt particularment amb els de les ciències de la societat, com són els models econòmics, per exemple. Em proposo ara d'assenyalar alguns d'aquests inconvenients.

1. Moltes vegades, unes tècniques adients en un cert entorn aplicatiu i relativament de poc preu són substituïts per d'altres d'àmbit aplicacional més ampli i més cares. La pressió publicitària sol ser decisiva. Un exemple senzill: una empresa petita utilitza dues variables econòmiques en el temps (sèries temporals) per a preveure la xifra de vendes d'un producte en una determinada zona; la tecnologia que requereix és simple i barata, però un *soft* magníficament presentat i un argumentari de venda d'aquest *soft* també molt ben elaborat fan que la petita empresa s'enlluerni

i compri un producte del qual només en farà servir un 10 %, per exemple.

2. Si en la formació del futur usuari de tècniques s'ha incidit excessivament en aquestes des del punt de vista purament aplicatiu (encara que es doni el fonament teòric de la seva construcció), sense que això vingui acompanyat d'una panoràmica crítica i de conjunt amb relació a l'àmbit de la disciplina de què es tracta, així com de la relació amb altres àmbits, pot ocórrer que el pràctic assumeixi una òptica parroquial —dit metafòricament i sense cap menyspreu vers la tasca parroquial, absolutament necessària, sinó per no necessitar superar la visió estreta i unilateral— de les qüestions que l'afecten professionalment. Valdria aquí, *mutatis mutandis*, el que deia un ministre d'Hisenda de Carles IV, don Diego de Saavedra: «El horizonte político de los cortesanos no se extiende más allá del recinto del palacio de su señor.» La visió crítica i la de conjunt han de permetre que la ignorància de la qual s'és conscient formi part dels nostres propis sabers; d'això en podríem dir «rebre lliçons d'ignorància».

3. Per als estudiosos i professors seguidors de les estrelles científiques de la seva especialitat, poden aplicar les anteriors paraules de l'esmentat ministre. Però en aquest cas el retret ens sembla més greu encara, ja que implica un abandonament imperdonable d'un esperit crític del qual massa vegades ens vanagloriem i, sobretot, un desmai de la responsabilitat assumida davant dels alumnes.

4. Certs econòmetres (però crec que el comentari seria extensible sense dificultats a altres col·lectius), com a conseqüència de ser ensinistrats perquè coneguin les tècniques corresponents, saben bé què fan però no allò que la situació exigeix fer. Recorrent a una analogia, pot afirmar-se que són bons paletes però mals arquitectes; en una paraula, que donen excessiva importància a l'instrument i passen per alt que la durada del dia no ve determinada pel rellotge. En el camp de les ST, creiem que aquest és un avís particularment útil, ja que, per exemple, en els models ARIMA es parteix de la hipòtesi que la ST ve generada per un procés estocàstic que, després, haurà de contrastar-se amb la realitat. És a dir, no

es parteix de conceptes econòmics previs que suggereixin el tipus de model a construir, sinó solament d'un conjunt d'observacions, pretesament portadores de tota la realitat, de les quals es derivarà «necessàriament» el model econòmic a través de la citada tècnica.

5. En definitiva, convé invocar, per a rescatar-les de l'oblit, aquelles paraules de Sant Pau en la primera epístola als Corintis: «I si algú s'imagina que sap quelcom, encara no sap res com deu saber-ho» i, una mica després, «però mireu que aquesta llibertat vostra [i aquí entén «llibertat» com la d'utilització de certes teories, tècniques, models, instruments, etc.] no vingui a ser camí de mala petja per als febles».

6. Voldríem deixar dit que el terme «teoria» (en sentit estricte) no té per què coincidir semànticament sempre per a les ciències de la natura i les de la societat. En les primeres, serien correctes gairebé sempre les següents i formoses paraules de Fray Luis de León, quan afirma que la teoria «ha de poner la silla de la unidad sobre la muchedumbre de las diferencias»; en les ciències socials, en canvi, encara que sigui veritat que la teoria pot unificar, és probable que ho faci des d'un punt de vista conscient o inconscient, interessat a afavorir certs col·lectius en detriment d'altres. La teoria (que en grec significa «meditació») i les tècniques que li corresponguin poden passar a ser en aquests últims casos herald d'una realitat a imposar en comptes d'escorta de la realitat per a dirigir-la de manera que tingui en compte el col·lectiu humà en el més ampli sentit possible. Per això no pot acceptar-se, almenys dins l'àmbit de les disciplines socials (personalment crec que tampoc en el de les disciplines sobre la natura), que una ciència es mostri oblidosa i pensadora, ja que no harmonitzaria amb les necessitats de la col·lectivitat humana: serviria sols d'envaniment i d'ornament (de «vacaciones del espíritu», com deia Ortega) o, el que és pitjor, d'eina de domini.

7. En parlar d'eines de domini estem invocant implícitament l'ètica. Segons crec fermament, cal col·locar sempre la consciència ètica per damunt de la tècnica; dit d'un altra manera, cal imposar a aquesta un fi del qual està mancat per si mateixa. Essent, doncs, indispensable la tècnica perquè distints grups de per-

sones col·laborin entre si, cal procurar, a més, que tal col·laboració sigui compatible amb un esquema de valors que preservin i potenciïn la dignitat humana; en cas contrari, el tècnic perd la seva consciència de servidor per a enorgullir-se. En aquest cas, l'usuari de tècniques actua com una màquina més, i l'enorgulliment seria un interessant mecanisme psicològic (digne d'estudi, per altra banda) per a allunyar-se de la idea de comportar-se com una eina.

Tenint presents aquestes consideracions, i si les acceptem, hauríem d'advocar per un replantejament del sistema educatiu en la seva totalitat, començant pels mateixos ensenyaments que emanen de les famílies.



**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2003
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE QUÍMICA
CONCEDIT A
PETER AGRE
I RODERICK MACKINNON,
A CÀRREC
D'ANTONIO FERRER-MONTIEL,
DE LA UNIVERSITAT
MIGUEL HERNÁNDEZ
D'ELX**

La vida és possible gràcies a la contínua monitorització del medi ambient per part dels éssers vius. Des de riure fins a plorar, de l'alegria a la pena, de l'eufòria a la por, de la valentia a la timidesa, tot són respostes que depenen molt estretament de l'entorn. El nostre organisme disposa dels sensors capaços de reconèixer els estímuls i/o agressions externs, de les rutes per a l'assimilació i de la capacitat de crear una resposta d'acord amb el senyal rebut. Tot això és possible gràcies al sistema nerviós, un perfecte sistema de control i integració, que connecta d'una manera precisa tots i cadascun dels nostres òrgans i teixits al centre de decisió, el cervell. Per tant, la major part de les nostres activitats i funcions depenen del correcte funcionament del sistema nerviós. El sistema nerviós és únic en complexitat funcional, i pot rebre milers de dades d'informació simultània procedents dels diferents òrgans sensorials que després ha d'integrar per a generar una resposta adequada. La percepció d'una sensació es produeix gràcies a la comunicació veloç entre les cèl·lules nervioses (neurones). Aquestes cèl·lules, igual que les musculars, són capaces de transmetre la informació mitjançant canvis ràpids i transitoris en la diferència de potencial a través de la seva membrana cel·lular, un procés que genera senyals elèctrics discontinus. La generació i propagació d'aquests senyals elèctrics transitoris, coneguts amb el nom de potencials d'acció, és possible gràcies a la presència a la superfície de neurones de canals iònics, un tipus de proteïnes integrals de membrana que formen porus que permeten el pas selectiu d'ions entre l'interior i l'exterior de les cèl·lules. El flux d'ions a través d'aquests conductes genera un corrent elèctric. Malgrat que els canals iònics van ser descoberts inicialment en les cèl·lules nervioses i musculars, cal assenyalar que aquest tipus de dispositius moleculars també són presents en totes i cadascuna de les cèl·lules, des de limfòcits fins a espermatozous, incloses les cèl·lules que formen teixits o glàndules on tenen un paper funcional rellevant, que abraça des de la proliferació i diferenciació cel·lular fins a la secreció d'hormones. Tan important és el control del flux d'ions a través de les membranes, com

el transport d'aigua. Per a aquest darrer existeixen canals específics. És tal la importància dels canals iònics i d'aigua en la fisiologia i patologia dels éssers vius, que són una de les principals dianes de diversos fàrmacs i drogues. L'Acadèmia Sueca de les Ciències ha reconegut una vegada més la vital importància d'aquests dispositius moleculars i ha concedit els premis Nobel de Química 2003 a dos investigadors que han contribuït notablement a aclarir el disseny estructural i modes d'acció d'aquestes macromolècules.

Els canals iònics són conductes a través dels quals es posa en comunicació l'exterior i l'interior cel·lular, i es caracteritzen per tres propietats definides d'acord amb Steven A. Siegelbaum, de l'Institut Mèdic Howard Hughes, i John Koester, de l'Institut Psiquiàtric de l'estat de Nova York per: 1) condueixen ions; 2) reconeixen i seleccionen ions específics i, 3) s'obren i tanquen en resposta a senyals elèctrics, mecànics, tèrmics o químics. Els canals iònics constitueixen una família heterogènia de proteïnes que es poden classificar atenent a les seves propietats biològiques i mecanisme d'activació. D'aquesta manera, aquestes proteïnes es poden agrupar com canals iònics selectius a cations si permeten el pas d'ions amb càrrega positiva, o a anions, si permeen ions amb càrrega negativa. Depenent de l'ió permeant, els canals catiónics poden, al seu torn, classificar-se en selectius a K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , i no selectius entre cations. Per la seva banda, els canals aniónics són permeables entre altres a l'ió clorur. Una classificació complementària és la que fa servir com a propietat el mecanisme de la seva activació. En aquest cas, disposem de canals iònics activats per lligand (un senyal químic), els activats per voltatge (un senyal elèctric), per calor (un senyal tèrmic), i per pressió (un senyal mecànic).

A més dels canals iònics, la natura ha dissenyat també canals d'aigua, especialitzats a facilitar el pas bidireccional d'aigua a través de les membranes cel·lulars. A diferència dels canals iònics, els canals permeables a l'aigua no generen corrents iònics, i aquesta propietat ha estat un handicap important a l'hora d'identificar-lo. No obstant això, hom ha desenvolupat mètodes d'anàlisi alternatius que han permès el seu estudi estructurofuncional.

Estructuralment, els canals iònics són grans proteïnes integrals de membrana que la travessen per complet formant un porus aquós. Estan formats per l'associació entorn d'un eix central de simetria de 2-5 subunitats proteïques iguals (homooligòmers) o diferents i codificades cada una per un gen distint (heterooligòmers). A aquesta complexitat estructural cal afegir-hi l'existència de proteïnes accessòries que tenen un paper important en la modulació de l'activitat biològica d'aquestes proteïnes. El *modus operandi* és comú als diferents tipus canals iònics: la recepció d'un senyal activador provoca un canvi conformacional en la proteïna des d'un estat tancat, no conductor, fins a un estat obert que permet el pas selectiu dels ions. En l'estat obert, aquests dispositius moleculars són capaços de conduir fins a 100.000.000 d'ions per segon sense comprometre la seva selectivitat iònica. Aquesta elevada velocitat de permeació és necessària per a rendir una comunicació cel·lular ràpida i eficaç que preservi el funcionament fisiològic del sistema. Una propietat important dels canals iònics, que assegura la transitorietat en la transmissió de senyals, és la seva adaptació a la presència prolongada de l'estímul activador mitjançant el procés d'inactivació o dessensibilització, que trasllada la proteïna a un estat no conductor.

Tot i que l'existència de canals iònics va ser postulada cap a mitjan segle XX, la seva demostració no ha estat possible fins més modernament, amb el desenvolupament de tècniques electrofisiològiques refinades, com la que es coneix amb el nom de *patch-clamp*. Actualment, els gens que codifiquen la major part dels canals han estat clonats i seqüenciats. Per aquest motiu, hom disposa de l'estructura d'aminoàcids de les proteïnes que formen els diversos canals. Aquest fet ha facilitat la identificació de zones en aquestes molècules responsables de les seves característiques funcionals. Per exemple, en els canals activats per canvis en el voltatge de la membrana hi ha una regió rica en aminoàcids carregats positivament, que es disposen d'una manera determinada. Aquest domini dota de sensibilitat el voltatge als canals coneguts amb el nom de

«voltatgedependents» i no és present en els canals activats per lligand. En general, la majoria dels canals voltatgedependents estan formats per subunitats principals, denominades en general subunitats α i subunitats accessòries, denominades β . Les subunitats β són més petites que les α , i presenten una estructura diferent. Tot i no ser les principals, aquestes subunitats són molt importants, atès que modifiquen les propietats de les subunitats principals, com són la sensibilitat al voltatge, la localització en la membrana, i els nivells d'expressió.

LA GESTA DE RODERICK MACKINNON

Roderick Mackinnon va néixer a Massachusetts l'any 1956. Des de ben jove ja va mostrar interès pels temes científics, i va aconseguir el seu BA (Bachelor of Arts) en bioquímica per la Universitat de Brandeis l'any 1987. En aquesta universitat va tenir el seu primer contacte amb els canals iònics al laboratori de Christopher Miller, on es va contaminar de l'entusiasme i energia per la bioquímica i biofísica dels canals de Chris Miller. No obstant aquest fet, prèviament a la seva immersió en la investigació científica bàsica, va aconseguir l'MD (Medical Doctor) a la Universitat de Tufts l'any 1982. I fins al 1986 es va dedicar a treballar com a metge, professió que, malgrat que li agradava, no arribà a satisfer la seva curiositat per aprendre les bases moleculars dels éssers vius i, més concretament, la química i biologia dels canals iònics. Per aquest motiu, l'any 1986 es va tornar a traslladar a la Universitat de Brandeis a treballar amb Chris Miller. Durant la seva etapa post-doctoral, Roderick es va centrar en l'estudi dels canals iònics activats mitjançant voltatge amb la finalitat d'entendre'n el mecanisme funcional sobre la base de la seva arquitectura molecular. Els primers estudis van consistir a obtenir relacions estructura-funció basades en l'alteració puntual de l'estructura primària dels canals i en el mesurament de les seves conseqüències funcionals. D'entre les seves contribucions a l'enteniment de com funcionen els canals iònics cal destacar-ne dues: 1) el descobriment de la regió o domini

proteic que estructura l'anomenat filtre de selectivitat que tenen aquests canals i que els permet discriminar eficaçment entre els diferents ions; i 2) un mapa estructural del filtre de selectivitat mitjançant l'ús de toxines naturals que s'hi uneixen amb una elevada afinitat. La resolució de l'estructura tridimensional de les toxines, juntament amb la identificació dels residus responsables de la unió, aportava una imatge estructural de l'anomenada *regió del porus aquós*.

Però la inquietud i l'ambició de Roderick Mackinnon el van dur molt més enllà. El seu somni, i el de qualsevol biofísic de canals, consistia a desxifrar l'arquitectura molecular d'aquests canals amb una resolució que permetés veure amb detall els principis estructurals i químics usats per la natura per a acomodar en una macromolècula eficaçia, selectivitat i sensibilitat. La meta no era fàcil per diversos motius: 1) els canals iònics són proteïnes de membrana la producció i cristallització de les quals, per a estudis estructurals mitjançant difracció de raigs X, continua essent un repte; únicament va resultar reeixida per a casos puntuals, generalment de proteïnes de procariotes; i 2) la grandària dels monòmers que conformen els canals iònics voltatge dependents és massa gran per a abordar la seva estructura per RNM, el límit del qual en pes molecular és al voltant de 15.000 daltons. Amb aquests inconvenients no és pas sorprenent que Roderick Mackinnon trobés molt d'escepticisme entre la comunitat científica i moltes dificultats per a finançar aquesta meta. Malgrat tot, però, l'any 1996, el president de la Universitat Rockefeller va creure a ulls clucs en les idees de Roderick, i el va contractar i finançar pel que en aquella època eren unes «idees boges». Tanmateix, Roderick va tardar poc temps a demostrar la viabilitat de la seva proposta, en revolucionar l'àrea dels canals iònics mitjançant la cristallització i resolució estructural a nivell atòmic d'un canal iònic selectiu a potassi.

Com es va forjar l'assoliment d'aquesta fita tan important? Per descomptat, amb convicció, molta perseverança i una molt elevada confiança en les idees. No podem oblidar, tampoc, l'ajut de la natura. L'any 1995, el grup alemany liderat per R. Wagner a la Universitat d'Osnabruck va publicar a *EMBO J.* la identificació i carac-

terització d'un canal de potassi de *Streptomyces lividans* amb dos segments transmembrana, el KcsA. El KcsA constituïa el primer canal iònic selectiu en procariotes que, a més, mostrava una notable similitud amb el domini de permeació dels canals activats per voltatge i selectius a K^+ eucariotes. En aquest sentit, sembla que KcsA sigui el gen ancestral a partir del qual han evolucionat els canals K^+ eucariotes. I són precisament les implicacions evolutives del descobriment del KcsA les que sàviament Roderick Mackinnon va fer servir, ja que va raonar que aquest canal procariota podria considerar-se com un motlle realista de la regió que estructura el porus aquós dels canals selectius a K^+ d'organismes eucariotes. La naturalesa procariota del KcsA representava un avantatge quant a la producció de la proteïna, una de les grans limitacions dels congèneres eucariotes. Encara més, ja hi havia diversos antecedents de cristallització de proteïnes de membranes procariotes en cristalls d'elevada capacitat difractiva. Arreplegant aquesta informació, el laboratori de Roderick Mackinnon es va proposar de resoldre l'estructura atòmica del canal KcsA. Aquesta fita la va aconseguir l'any 1998 en un treball publicat a la revista *Science*. No sols va descobrir l'arquitectura atòmica del KcsA, sinó que també va desvelar els principis fisicoquímics de la selectivitat iònica en termes de l'estructura molecular. El somni dels biofísics de canals començava a fer-se realitat. I més es va començar a constatar quan el mateix grup va resoldre l'estructura del mateix canal en l'estat obert, aportant informació més precisa sobre les bases de la permeació iònica.

La resolució de l'estructura tridimensional de KcsA fou la primera d'una brillant sèrie d'assoliments. Aplicant el mateix raonament, és a dir, buscant en els organismes procariotes els gens ancestrals de les proteïnes eucariotes, l'any 2002 van desvelar el disseny arquitectònic d'un canal selectiu a anions, el CLC. La comparació de les estructures d'aquests dos canals, el selectiu a cations i el selectiu a anions, va descobrir diferents principis de la natura per a distingir entre els dos tipus d'ions. Així, els canals selectius a cations fan ús d'una simetria bàsica en la disposició espacial de les seves subunitats, mentre que els selectius a anions s'estimen més explotar la utilitat de la simetria invertida.

Encara quedava, però, un repte per assolir. Tal com ja s'ha comentat, els canals activats per voltatge selectius a K^+ són proteïnes modulars compostes per dos mòduls, és a saber, un de permeació que controla la selectivitat iònica, i un d'activació que transduïx els canvis de voltatge en canvis conformacionals de la proteïna que la porten des de l'estat tancat, no conductor, fins a l'estat obert, conductor. Aquest darrer mòdul s'anomena sensor de voltatge. Novament, fent ús de la natura mateixa i de la seva constància, evolucionar a partir de principis bàsics, juntament amb el tremend avenç en la seqüenciació de genomes procariotes, el grup de Roderick Mackinnon va identificar un canal iònic en el microorganisme *Aeropyrum pernix*, el KvAP, que semblava l'avantpassat complet d'un canal voltatgedependent selectiu a K^+ . Pel mes de maig de 2003, aquest grup va destapar l'estructura més esperada en el camp de la neurobiofísica, la d'un canal de K^+ complet, que contenia el sensor de voltatge i el porus aquós. Novament, a més de mostrar el preciós disseny arquitectònic elaborat per la natura, l'estructura ha aportat informació valuosa del procés de *gating*, és a dir, de la transducció de l'estímul físic en un canvi conformacional de la proteïna. Una conseqüència immediata ha estat una reconsideració dels models en ús des de la clonació del primer canal iònic pel grup del doctor Numa. Així, del moviment helicoidal a través del camp elèctric imposat per la bicapa lipídica d'un segment proteic carregat positivament, al moviment «raqeta» de dos segments interaccionant estretament formant una forma de paleta.

Sens dubte, l'aportació de Roderick Mackinnon al coneixement científic és altament mereixedora del Premi Nobel.

LA PERSPICÀCIA DE PETER AGRE

Malgrat que l'aigua és l'element més abundant de tots els fluids biològics, els mecanismes moleculars implicats en el seu transport a través de les membranes biològiques han romàs evasius. Durant molt de temps es va creure que l'aigua podia difondre passiva-

ment, amb dificultat, però, per les membranes biològiques, sense necessitat d'estructures proteiques específiques. No obstant això, l'elevada permeabilitat aquosa de determinades cèl·lules com les renals i els eritròcits, suggeria la presència de canals específics. Encara més, s'havia vist que el transport d'aigua cel·lular era molt sensible al Hg^{2+} , i que estava exquisidament regulat per hormones. Tot plegat, per descomptat, apuntava a la presència de dispositius proteics en les membranes cel·lulars responsables del transport d'aigua. Aquestes macromolècules haurien de permetre el pas específic d'aigua i impedir la difusió de protons (H_3O^+). L'any 1998, en un treball seminal publicat a *The Journal of Biological Chemistry*, Peter Agre i el seu grup van purificar una proteïna de 28 kDa en la membrana cel·lular dels eritròcits, que l'any 1992 van demostrar que posseïa la important propietat d'ésser un canal selectiu d'aigua. Aquesta proteïna la van denominar *Aquaporina-1* (AQP-1).

Peter Agre va néixer a North Field, Minnesota, l'any 1949. Va obtenir el seu BA (Bachelor of Arts) en química per la Universitat de Minneapolis l'any 1970. Posteriorment es va traslladar a la Universitat John Hopkins, a Baltimore, on l'any 1974 va aconseguir l'MD (Medical Doctor). Des d'un primer moment, Peter Agre va tenir clara la seva vocació científica i inicià la seva formació postdoctoral sense exercir de metge. Malgrat que els seus estudis postdoctorals i primers anys d'investigador independent van estar fonamentalment centrats en el sistema immune i patologies associades, aquests van haver de canviar de rumb de manera inesperada en el moment en què els canals d'aigua es van creuar en la seva trajectòria científica.

El descobriment i la identificació d'AQP-1 com a canal d'aigua exemplifica molt bé la intuïció d'un gran científic com Peter Agre i, per aquest motiu, considero que mereix d'ésser breument relatada. En la dècada dels vuitanta, el professor Peter Agre estava interessat en l'estudi molecular dels antígens d'immunitat Rh. Aquestes proteïnes les purificaven cromatogràficament de membranes d'eritròcits per la seva abundància. En el procés de purificació de l'antigen Rh sempre les copurificava de manera

abundant una proteïna de 28 kDa d'identitat desconeguda, és a dir, un contaminant. Amb el fi de poder eliminar aquesta contaminació, van decidir d'aïllar i estudiar la naturalesa d'aquesta proteïna. Aquests estudis van dur a la clonació del gen que codifica la proteïna de membrana de 28 kDa. El coneixement de la seqüència d'aminoàcids de seguida va revelar una homologia a proteïnes de la mosca, lent bovina, procariotes i plantes de funció desconeguda. Estudis d'expressió i distribució tissular van resultar fonamentals per a suggerir la funció de 28 kDa. La proteïna s'expressava majoritàriament en teixits altament permeables a l'aigua, implicant un paper en aquesta funció. Un experiment molt simple, i alhora molt elegant, va donar una resposta molt concloent. L'assaig va consistir a avaluar l'efecte de l'expressió del gen de la proteïna de 28 kDa en ovòcits de la granota *Xenopus*. Aquestes cèl·lules són conegudes per la seva elevada impermeabilitat a l'aigua, de manera que constitueixen un sistema ideal per a l'estudi de proteïnes presumptament implicades en el transport d'aigua. Es va observar que l'expressió de la proteïna de 28 kDa augmentava espectacularment la permeabilitat dels ovòcits a l'aigua, i que fins i tot els feia explotar. Aquest efecte era inhibit per concentracions micromolars de Hg^{2+} . Es demostrava, per tant, que la proteïna de 28 kDa, aïllada d'eritròcits, facilitava el transport d'aigua a través de les membranes cel·lulars, amb la qual cosa l'AQP-1 era un canal d'aigua. I, per descomptat, es va provar que AQP-1 era un canal selectiu a aigua que no permet la difusió de protons ni d'altres ions, la qual cosa resulta en l'absència de corrents iònics associats al transport. A més de l'extrema selectivitat mostrada per AQP-1, també es va observar una fastuosa eficàcia transportadora de $\approx 3 \cdot 10^9$ molècules d'aigua/s.

Estructuralment, les subunitats d'AQP-1 estan compostes per sis hèlixs alfa organitzades amb una pseudosimetria de tipus 2. La similitud de l'estructura al vas usat en els rellotges d'arena li ha encunyat el nom de *hourglass model*. En el centre, estructurant el filtre de selectivitat, hi ha la seqüència asparagina-prolina-àspàtic (NPA), envoltada de dues càrregues positives i residus hidrofòbics que impedeixen l'entrada d'ions. Aquesta estructura és compatible

amb la bidireccionalitat que ha de tenir un transportador d'aigua. L'estructura del transportador funcional és un tetràmer format per quatre subunitats idèntiques, cadascuna de les quals té capacitat transportadora. De l'estructura es dedueix que l'eficàcia catalítica prové fonamentalment de la presència de columnes contínues d'aigua en el porus de cada subunitat d'AQP-1. Igual com s'esdevé amb els canals de K^+ activats per voltatge, l'estructura atòmica d'aquests canals ha resultat fonamental per a conèixer els secrets del seu *modus operandi*.

Com succeeix generalment, el descobriment d'AQP-1 va marcar l'inici de l'establiment d'una família de proteïnes, les AQP. Des de la descoberta de l'AQP-1, s'han identificat en diferents organismes i teixits un total de tretze isoformes diferents d'AQP, entre les quals hi ha les proteïnes permeables a aigua i les permeables a aigua i glicerol. Totes plegades estan, s'expressen, malgrat que diferencialment, en teixits i cèl·lules implicades en permeabilitat a aigua, de manera que hi ha cèl·lules com les neurones, que estan mancades d'aquestes proteïnes.

Sens dubte, la identificació d'AQP-1 com un canal d'aigua va marcar una fita científica sense precedents, que ha permès de comprendre amb exquisit detall els mecanismes de la permeabilitat a aigua de les cèl·lules i els teixits, així com comprendre les conseqüències patològiques de la seva disfunció. I, tot plegat, gràcies a l'astúcia de Peter Agre, mereixedor sense pal·liatius del Premi Nobel 2003.

57

CANALS IÒNICS I D'AIGUA I SALUT HUMANA: LES CANALOPATIES

Què succeeix quan aquests dispositius moleculars funcionen incorrectament? Gràcies als avenços de la genètica, la bioquímica i biologia molecular, i l'electrofisiologia, hom ha descobert que alteracions en la funció d'aquestes proteïnes són les principals responsables de diverses malalties humanes, conegudes amb el nom de patologies associades als canals iònics o canalopaties. Tot i que aquest terme es va encunyar a les alteracions dels canals

iònics, ara cal incloure-hi les alteracions dels canals d'aigua. Les canalopaties són el resultat de diverses alteracions, tant en canals catiònics com aniònics i d'aigua, i poden ésser adquirides, per exemple, gràcies a una reacció immune o a l'efecte d'una toxina, o hereditàries, conseqüència de mutacions en els gens que codifiquen les subunitats proteïques que formen els canals. Les canalopaties hereditàries poden sorgir com a conseqüència d'un guany en la funció del canal iònic implicat, o per una pèrdua de la funció, o per un efecte dominant negatiu de la subunitat mutada. En qualsevol cas, una característica pròpia de les canalopaties hereditàries la constitueix la naturalesa intermitent o episòdica dels seus símptomes, probablement a causa del fet que alteracions profundes en la funcionalitat d'aquestes proteïnes comporten conseqüències letals.

Sembla evident que després de la seqüenciació del genoma humà, i amb el progrés creixent de la genètica molecular, el nombre i heterogeneïtat de mutacions en subunitats proteïques de canals iònics i d'aigua que es vinculin a patologies augmentarà, especialment en aquelles famílies de canals que encara no s'han associat a malalties. Per exemple, els receptors activats per estímuls mecànics i tèrmics que tenen un paper clau en la transducció de senyals sensorials, la disfunció dels quals s'ha postulat com a possible causa de diversos tipus de dolor crònic. En qualsevol cas, el coneixement sobre l'etiologia de les canalopaties ja adquirit, i el que generarem en els pròxims anys, permetrà disposar de mètodes de diagnòstic primerenc d'aquestes malalties que ajudaran a pal·liar o disminuir la incidència i/o gravetat de les crisis simptomàtiques associades als mateixos. *A priori*, l'única manera de corregir aquestes patologies genètiques passa per la teràpia genètica, reemplaçant el gen mutó per un de nou. No obstant això, fins que aquest tipus d'estratègia sigui eficaç, es poden portar a terme altres tipus d'actuacions per tal de reduir la severitat dels símptomes. D'aquesta manera, un diagnòstic precoç proporciona oportunitats per a implantar teràpies preventives com, per exemple, dietes adequades per a les hipercalcèmies i les hipocalcèmies. També es poden aplicar teràpies que disminueixin l'excitabilitat del sistema nerviós, bé potenciant els sistemes inhibidors o bloquejant els

excitadors. A més, es poden proposar estratègies regeneratives amb cèl·lules mare en aquelles patologies amb un component neurodegeneratiu important. El disseny de tractaments més bons i més eficaços es traduirà en un increment de la qualitat de vida de les famílies que pateixen canalopaties. I al disseny de tractaments terapèutics més bons hi contribuirà notablement el coneixement de l'arquitectura molecular de les proteïnes que les provoquen. En aquest àmbit, la contribució arquitectònica de Roderick Mackinnon i Peter Agre al camp dels canals de membrana ha estat i serà absolutament bàsica. Ara coneixem molt més com estan construïts i com funcionen els canals de comunicació de la vida. Aquest coneixement és essencial per a rectificar el funcionament quan sigui anòmal, si s'esdevé.



ELS PREMIS NOBEL

DE L'ANY 2003

SOBRE EL

PREMI NOBEL DE FÍSICA

CONCEDIT A

ALEKSEI A. ABRIKOSOV,

VITALI L. GINZBURG

I ANTHONY J. LEGGETT,

A CÀRREC DE

JOSEP FONTCUBERTA

I XAVIER OBRADORS,

DE L'INSTITUT DE CIÈNCIA

DE MATERIALS DE BARCELONA (CSIC)

SUPERCONDUCTIVITAT I SUPERFLUÏDESA. UN PREMI PER LA COMPRESIÓ D'EFFECTES QUÀNTICS BEN VISIBLES

Els premis Nobel de Física de l'any 2003 han estat concedits a V. Ginzburg, A. Abrikosov i A. Leggett, investigadors que han contribuït decisivament a la comprensió de la superconductivitat i superfluïdesa, propietats que presenten alguns materials a baixa temperatura. La superconductivitat és el nom que pren la superfluïdesa quan el fluid que es tracta està format per partícules amb càrrega elèctrica. Aquesta propietat ens permet observar a escales macroscòpiques de longitud (de 10^{-3} m - 10^6 m) efectes quàntics que típicament tan sols són rellevants a escales de la mida d'un àtom ($\sim 10^{-10}$ m). Sens dubte, les propietats dels superfluids són interessants per si mateixes, però també han estat el motor que ha estimulat el desenvolupament de noves eines conceptuals i han fet possible que avui els superfluids formin una part essencial de sistemes i dispositius que afecten de manera important la nostra vida. Probablement, els imants superconductors inclosos en els sistemes de diagnòstic clínic per ressonància magnètica nuclear en són l'exemple més palès —de fet, l'Acadèmia sueca ha concedit el Nobel de Medicina 2003 a Paul C. Lauterbur i Peter Mansfield «per la seva contribució al desenvolupament d'aquests sistemes», però no són els únics: avui superfluids superconductors s'usen per a telecomunicacions de més qualitat, per al transport d'energia i també per al confinament de plasmes en reactors de fusió.

L'Acadèmia Sueca de Ciències ha reconegut les aportacions de Ginzburg, Abrikosov i Leggett, i la seva «contribució pionera en la teoria de superconductivitat i superfluïdesa» en atorgar-los el Premi Nobel de Física d'enguany.

Per a descriure i comprendre quines han estat les contribucions dels premiats, ens cal seguir alguns passos. En primer lloc (apartat 1), revisarem qui va descobrir els superfluids, quan i com. En segon lloc (apartats 2.1 i 2.2), repassarem alguns conceptes clau, com són el paràmetre d'ordre de l'estat superfluid i la relació entre magnetisme i superconductivitat. En l'apartat 3 (3.1, 3.2 i 3.3), revisarem les aportacions de Ginzburg, Abrikosov i Leggett

que els han valgut el Nobel de Física del 2003. Acabarem (apartat 4) amb un breu comentari sobre l'impacte de les contribucions dels premiats, així com amb una reflexió sobre l'activitat científica que en àrees relacionades s'està desenvolupant en les universitats i centres de recerca catalans.

1. SUPERFLUIDS

La superconductivitat la va descobrir, a Leiden (1911) H. Kamerling Onnes. Aquest descobriment va ser la conseqüència del progressiu desenvolupament de tècniques per aconseguir temperatures més i més baixes i que ja havia començat a Suïssa, quan L. Caillet i R. Pictet van ser capaços de liquar «gasos permanents» com són el nitrogen, l'aire o l'hidrogen. Michael Faraday els va batejar amb el nom de «gasos permanents» després dels seus esforços inútils, dos-cents anys abans, per liquar-los. El camí va seguir amb Z. F. Wroblewski (Cracòvia), que va rebre en condensar aire líquid (1891) i va poder observar que la resistència elèctrica dels metalls disminueix quan es redueix la temperatura, però no es fa nul·la. J. Dewar, l'any 1892, va inventar un recipient (que avui porta el seu nom) i que li va permetre obtenir quantitats significants d'hidrogen líquid.

L'heli no es va descobrir a la Terra sinó al cel. Es va descobrir en observar l'espectre d'emissió de la llum del sol durant un eclipsi de sol visible des de l'Índia (1868). L'astrònom francès Jules Janssen va veure una línia groga en l'espectre de llum que li arribava. La va assignar a un element que encara no havia estat descobert a la Terra. Per aquest motiu li va atribuir el nom d'*heli* (*Hèlios*, 'Sol' en grec). L'any 1895, W. Ramsay en va observar en mines d'urani i posteriorment en jaciments de gas natural. Poc més de deu anys després, K. Onnes a Leiden (1908) va aconseguir liquar-lo, cosa que succeeix a temperatures properes a 4 K, malgrat els seus esforços, observaren que, fins a 1 K (la temperatura més baixa que podien assolir), aquest líquid *misteriosament* no se solidificava. Avui sabem que això es deu al fet que s'anomena *energia*

de punt zero i que és un efecte purament quàntic. El que és rellevant, però, és que van observar (1910) que la densitat de l'heli líquid presenta un màxim a una certa temperatura (~ 2 K) i, malgrat que els va sorprendre molt, van seguir amb el seu camí, que no era altre que estudiar el comportament dels metalls a temperatura molt baixa. Així, a l'abril de 1911, K. Onnes va reportar que la resistència elèctrica del mercuri disminueix ràpidament quan és refredat per sota de 4,2 K i es fa immensurablement petita. Havia descobert la *superconductivitat del mercuri* (així va anomenar aquesta propietat) i el 1913 li van concedir el Premi Nobel de Física. Va observar que un camp magnètic aplicat feia desaparèixer aquesta propietat, i a la primavera de 1914 Onnes va descobrir que un corrent induït en un llaç superconductor persistia per llargs períodes de temps sense degradar-se com passa en un metall normal.

La Primera Guerra Mundial va significar el final dels experiments a baixa temperatura, els quals no es van reprendre fins als anys vint. K. Onnes va tornar a interessar-se per les propietats d'aquell fluid estrany (He) i va observar (1922-1923) que el màxim de densitat que havia mesurat a 2,2 K, va acompanyat d'un canvi molt pronunciat de la calor específica del líquid. Avui sabem que aquests canvis indiquen l'entrada a un nou estat de la matèria: la superfluidesa de l'heli. De fet, qui es va adonar de la superfluidesa (la pèrdua de viscositat) va ser Pyotr Kapitza (premi Nobel de 1978). La semblança entre els dos fenòmens és ben evident: pèrdua de viscositat elèctrica (resistència elèctrica) al moviment de càrregues en un fluid carregat (Hg) o pèrdua de viscositat hidrodinàmica en el fluid no carregat (He). Hi ha dos isòtops del He (^4He i ^3He) amb abundàncies relatives de 99,999 % i 0,001 %. Així, doncs, podem assumir que els treballs als quals ens hem referit fins ara, responen a les propietats de l'isòtop majoritari, ^4He .

Un altre ingredient major per a la descripció de la superconductivitat va ser la troballa feta per W. Meissner i R. Ochsenfeld (Berlín, 1933), segons la qual un superconductor és a més a més un diamagnet perfecte; és a dir, en presència d'un camp magnètic aplicat, el superconductor expulsa del seu interior totes les línies de camp magnètic i ho fa tant si el camp s'aplica després d'un procés

de refredament fins a $T < T_C$, on T_C és una certa temperatura crítica, a camp nul —això ho faria també un metall ideal amb resistivitat zero ($\rho = 0$)—, com si el camp s'aplica a $T > T_C$ i després es refreda —un metall ideal ($\rho = 0$) no expulsaria el camp. Notem que, si cal que la inducció magnètica sigui nul·la a l'interior del superconductor, es necessita que hi hagi corrents (diamagnètics) que generin un camp que s'oposi al camp aplicat i l'anul·li.

Aquesta observació, juntament amb el fet que la superconductivitat és suprimida en presència d'un camp magnètic suficientment gran (camp crític termodinàmic) i amb el fet que aquesta transformació és reversible, van posar de manifest que l'estat superconductor és un estat termodinàmic ben definit de la matèria.

C. J. Gorter i G. Casimir (1934) van proposar un model de dos fluids per a descriure la transició entre l'estat normal i el superconductor. Una part del fluid són els electrons condensats en el superfluid superconductor i l'altra serien els electrons normals. Naturalment, a alta temperatura ($T > T_C$) tan sols hi hauria electrons normals, i per sota de T_C la fracció d'electrons superconductors creixeria paulatinament.

La descripció de l'existència de corrents superficials diamagnètics va ser proposada pels germans London (1935), que el·laboraren un simple model fenomenològic per a descriure el diamagnetisme perfecte en el qual s'adaptaven *ad hoc* les equacions constitutives del material. Van imposar una llei constitutiva $\mathbf{J} \approx -(1/\lambda^2)\mathbf{A}$ —on \mathbf{A} és el potencial vector— en la qual la presència de corrents (\mathbf{J}) en el material està lligada a les variacions *espacials* del camp magnètic. Notem que, en un metall normal, l'aparició de corrents està associada a la variació *temporal* d'un flux de camp magnètic. Així sorgeix de manera natural una longitud característica (λ , longitud de penetració) que mesura la distància necessària per a atenuar el camp magnètic a l'interior del superconductor i al mateix temps mesura el gruix de la pell del superconductor, per dintre de la qual circulen els corrents diamagnètics d'apantallament.

Aquell mateix any (1934), Fritz London ja va suggerir que la relació constitutiva que ell havia proposat podria sorgir de la mecànica quàntica (formalment és la mateixa) si existís una funció

d'ona Ψ per al superfluid i que aquesta no depengués de la posició ($\nabla\Psi = 0$), és a dir, que fos rígida. Sens dubte, Fritz London estava posant les pedres al camí que altres estaven a punt de recórrer. En un llibre seu publicat l'any 1950, F. London escriu: «l'estat superconductor suggereix una estructura quàntica macroscòpica que és com una solidificació o condensació de la distribució de velocitats (moments) dels electrons. Aquesta solidificació lliga el moment de cada partícula a la del tot i s'estén sobre distàncies apreciables».

L'altre ingredient essencial va ser el descobriment —E. Maxwell i, independentment, Reynolds (1950)— del que s'anomena *l'efecte isotòpic*; és a dir, la temperatura crítica del material depèn de la massa dels àtoms que constitueixen el sòlid. Aquest resultat va donar una pista «inequívoca» que les vibracions de la xarxa cristal·lina (els fonons) tenien un paper clau en l'establiment de correlació entre el moviment dels electrons.

La idea que tenim avui és que per sota d'una temperatura característica, anomenada *temperatura crítica* (T_C), les partícules que constitueixen el superfluid, bé siguin electrons en el Hg o bé àtoms neutres de ${}^4\text{He}$, condensen en un únic estat: un estat comú per a totes les partícules del sistema ($\sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$). En el cas del ${}^4\text{He}$ —àtoms amb capes plenes, un nombre parell de protons i de neutrons en el seu nucli, i per tant amb un espín enter—, esperem que es pugui descriure correctament amb la que s'anomena *l'estadística de Bose-Einstein* i que condensin *totes* les partícules (àtoms) en l'estat de més baixa energia. És a dir, que formin un condensat de Bose-Einstein. L'entrellaçat del moviment d'un nombre tan gran de partícules en el mateix estat és el responsable últim que cap d'aquestes partícules no pugui perdre energia, i per tant el fluid no és viscos. La situació amb el fluid electrònic és molt més complexa. El problema rau en el fet que els electrons tenen càrrega elèctrica i espín semienter. Així, doncs, per als electrons val l'estadística de Fermi-Dirac i el principi d'exclusió (anomenat «de Pauli») que se'n deriva. No podem tenir dues partícules en el mateix estat. Una idea immediata per a resoldre la dificultat consistiria a imaginar tenir parelles formades i lligades d'electrons amb el seu espín oposat, de manera que el conjunt es comportés com si

tinguessin un espín total enter, i llavors ens trobaríem que, igual que els àtoms de ${}^4\text{He}$, es podrien comportar com a bosons i condensar en un estat comú. Malauradament, però, la situació no és tan simple, ja que els electrons senten una forta repulsió coulombiana i, per tant, cal trobar una font d'energia que superi la barreira coulombiana i els estimuli a aparellar-se. La dificultat és òbvia, i és fonamentalment per aquest motiu que, entre el descobriment de la superconductivitat en Hg i el descobriment d'una teoria microscòpica satisfactòria que descriu el fenomen, van haver de passar gairebé cinquanta anys. L'any 1957, John Bardeen, Leon Cooper i Robert Schrieffer van mostrar que electrons amb espín (s) i moment (k) oposats ($s\uparrow, k\downarrow$) formen parelles (de Cooper) [$(s\uparrow, k\downarrow) - (s\downarrow, k\uparrow)$] i que l'acoblament entre ells ve donat per la seva interacció amb la xarxa de fonons. Aquesta és l'anomenada *teoria BCS*, i els seus autors van ser guardonats amb el Premi Nobel de 1972.

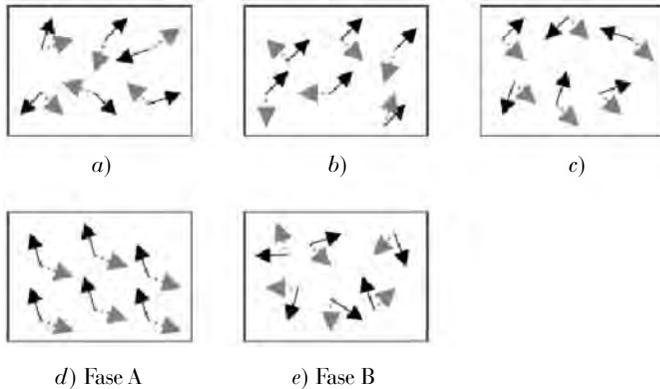
Els electrons condensats en parelles, en la teoria BCS, són objectes simètrics (orbitals de tipus s , $S = 0, L = 0$) i també ho són els àtoms de ${}^4\text{He}$. Així, doncs, es parla de *fluids isotròps*. Què passaria, però, si la funció que descriu la parella no fos una ona de tipus s sinó amb una simetria diferent? Per exemple, podríem imaginar una situació en la qual la interacció repulsiva entre les partícules fos més forta i que, per tant, intentessin trobar una situació en la qual en mitjana estiguessin més separades. Aquest podria ser el cas si en comptes d'un orbital de tipus s fos elegit un orbital tipus p o d . En aquest cas es perdria la simetria esfèrica, i l'orientació de l'òrbita que descriuria la parella d'àtoms en l'espai podria ser rellevant. Un fluid amb aquestes característiques s'anomena *fluid anisòtrop* i el seu exemple és el ${}^3\text{He}$. L'heli ${}^3\text{He}$ té tres nucleons; és, doncs, un fermió, i la condensació es fa a través de la formació de parelles d'àtoms de ${}^3\text{He}$. Tal com veurem més endavant, A. Leggett, va proposar que la interacció dipolar nuclear és la responsable de la formació d'allò que podríem anomenar *molècules diatòmiques de ${}^3\text{He}$ - ${}^3\text{He}$* . En aquest cas cada parella té dos moments angulars característics (S, L) i que poden estar correlacionats i orientats diferentment en l'espai (fig. 1). Pel descobriment experimental de superfluïdesa en ${}^3\text{He}$ a tempera-

tures inferiors a 3 mK, a David Lee, Douglas Osheroff i Robert Richardson, el 1972, els van concedir el Premi Nobel de 1996.

2. CONCEPTES CLAU

2.1. TRANSICIONS DE FASE I PARÀMETRE D'ORDRE

El concepte de paràmetre d'ordre per a descriure transicions de fase —d'això és del que parlem quan volem descriure el pas



68

FIGURA 1. Es mostren els possibles estats en un fluid bidimensional anisòtrop, amb dos graus de llibertat: espín S (fletxes contínues) o moment angular orbital L (fletxes discontinües).

a) Estat desordenat: és isòtrop en relació amb l'orientació d'ambdós graus de llibertat. No hi ha ordre de llarg abast en cap grau de llibertat. El sistema és invariant respecte de rotacions tant de S com de L . b-e) Estats amb diferent tipus d'ordre de llarg abast i que corresponen a diferents possibles trencaments de simetria en la fase ordenada: b) trencament de simetria rotacional en l'espai d'espín (S) (líquid ferromagnètic); c) trencament de simetria en l'espai orbital (L) (cristall líquid); d) les simetries rotacionals de S i L estan trencades separadament (com en la fase A del ^3He ; vegeu el text); e) únicament la simetria relacionada amb l'orientació relativa de S i L està trencada (com en el punt B del ^3He ; vegeu el text).

de l'estat normal d'un metall al seu estat superconductor, o de l'heli al seu estat superfluid, o també l'aparició de ferromagnetisme en un material, etc.— surt de manera natural en adonar-se que en la majoria de les transicions de fase hi ha alguna quantitat física que passa a adquirir un valor no nul a l'estat ordenat. Aquest concepte el va introduir L. Landau l'any 1937. En el cas esmentat dels materials ferromagnètics, aquesta quantitat és òbviament la magnetització (\mathbf{M}), i així, doncs, aquest és el paràmetre d'ordre de la transició. A l'estat ferromagnètic ($T < T_C$), el sistema selecciona una direcció particular dels espins i d'aquesta manera $\langle \mathbf{M} \rangle \neq 0$; quan comparem aquest estat amb la situació que teníem en la fase paramagnètica ($\langle \mathbf{M} \rangle = 0$, a $T > T_C$), hem de reconèixer que el sistema ha disminuït la seva simetria, ja que ara, a $T < T_C$, l'energia ja no és invariant per rotacions de l'espín. En aquestes circumstàncies es parla de *trencament espontani de la simetria*.

Landau i Ginzburg van demostrar, en la dècada de 1950, que el paràmetre d'ordre apropiat en una transició a l'estat superfluid —bé sigui superconductor o ^4He — és un nombre complex (Ψ) que té dos components: una amplitud $\Psi(r)$ i una fase ϕ . Per a $T > T_C$, el valor de ϕ és irrellevant, és a dir, l'energia del sistema és invariant enfront de canvis arbitraris de fase. Per a $T < T_C$, el sistema selecciona un valor precís de ϕ i, per tant, la simetria en ϕ es trenca.

Identificar el paràmetre d'ordre en fluids no isòtrops com l'heli ^3He resulta més complicat. El problema rau en el fet que les parelles d'àtoms de ^3He , tal com hem dit acoblats per forces dipolars nuclears, es troben en un estat d'espín triplet ($S = 1$), és a dir —tal com ja hem vist en un ferromagnet—, la simetria rotacional d'espín està trencada. Al mateix temps, hem vist també que, atès que la simetria de la part orbital no és *s* sinó *p* ($L = 1$), es podria produir una orientació col·lectiva de totes les òrbites (com en un cristall líquid) i, per tant, trencar-se també la simetria de la part orbital. Si hi afegim la simetria en la fase ϕ , com ja hem vist en els superfluids isòtrops, resulta que hi ha tres simetries que es trenquen en la transició de fase. Leggett, l'any 1972, es va adonar que

en un sistema com aquest es poden produir diversos trencaments simultanis de simetria, una idea que va significar un canvi important en la teoria de transicions de fase i que va poder explicar les transicions observades pels descobridors de la superfluïdesa en ^3He , pocs mesos abans (1972).

Afegim encara que la teoria BCS tal com s'havia desenvolupat l'any 1957, no és aplicable a fluids no isòtrops. Aquest és el cas del ^3He , però també sembla que és el dels anomenats *superconductors d'alta temperatura*, descoberts per Georg Bednord i Alex Müller l'any 1986 i pel qual van rebre el Premi Nobel el 1987. De fet, mesures recents de la simetria de la funció d'ona indiquen que aquesta sembla tenir simetria $(x^2 - y^2)$ i no s . Així mateix, s'han descobert també altres superconductors on la simetria de la funció d'ona és p . A. Leggett ha contribuït decisivament a reescriure la BCS per fer-la capaç de descriure aquests fluids anisòtrops.

2.2. MAGNETISME I SUPERCONDUCTIVITAT

Ja hem indicat que la teoria BCS, tal com s'havia desenvolupat el 1957, no era aplicable a fluids anisòtrops. Tampoc no podia aplicar-se a fluids inhomogenis, on el paràmetre d'ordre pot variar de punt a punt. Aquesta no és una situació d'interès merament acadèmic, sinó que veurem que és la situació que es dona en molts superconductors —en tots els que tenen rellevància tecnològica— quan els sotmetem a camps magnètics. En aquest casos, i contràriament al que havien observat W. Meissner i R. Ochsenfeld, ara superconductivitat i magnetisme conviuen.

És aquí on la contribució d'A. Abrikosov, sens dubte basada en el treball previ de Ginzburg i Landau (G-L) dels anys cinquanta, s'obre camí. Ginzburg i Landau introdueixen la noció del paràmetre d'ordre en un sistema superconductor; l'aspecte clau de la teoria és que apareixen de manera natural dues longituds característiques del sistema: la longitud de penetració del camp magnètic (λ) i una nova longitud (longitud de coherència, ξ), que reflecteix la variació espacial del paràmetre d'ordre prop d'una interfície. Amb

aquestes quantitats, G-L, construeixen un paràmetre que no depèn de la temperatura, sinó tan sols de propietats específiques del material: $\kappa = \lambda/\xi$, anomenat *paràmetre de Ginzburg-Landau*, que permet fer la distinció entre dues famílies de superconductors: de tipus I i II segons els valors de κ . Introdueixen la idea d'energia superficial i estudien sistemes on la interfície entre un material superconductor i un de normal té una energia positiva ($\kappa < 1/\sqrt{2}$); és a dir, crear una frontera superconductora/normal té un cost en energia, de manera que la penetració de camp a l'interior està fortament penalitzada en energia. Aquesta propietat és comuna als elements superconductors que (com el Hg) s'havien descobert fins aleshores.

En els anomenats *superconductors de tipus I* ($\kappa < 1/\sqrt{2}$) el flux magnètic no pot penetrar en el seu interior (més enllà de la petita penetració superficial de profunditat λ , per on circulen el corrents d'apantallament). Atès que els superconductors coneguts fins als anys cinquanta, tenien tots $\kappa \ll 1$ (per al Hg, $\kappa \approx 0,16$), Ginzburg i Landau no van considerar convenient explorar les solucions del seu propi model per a valors de $\kappa > 1/\sqrt{2}$, que determina la frontera de les solucions i etiqueta l'altra família de superconductors: els de *tipus II*.

L'aproximació fenomenològica de G-L va resultar adequada per a descriure les propietats de molts dels materials, notablement les propietats magnètiques, termodinàmiques, anisotropia, resposta en funció de la temperatura, etc.

Amb la teoria de G-L desenvolupada, tal com s'ha dit, per a materials amb $\kappa \ll 1$, no n'hi havia prou, però, per a descriure les propietats dels nous materials, anomenats «bruts», com alguns aliatges o pel·lícules fines d'elements superconductors. De fet, les mesures de camps crítics fetes, entre 1951 i 1952, per N. V. Zavaritski en pel·lícules fines amorfes discrepaven obertament de les prediccions de G-L i que fins llavors s'havien verificat amb claredat. Va ser aquest desacord el que va estimular Abrikosov a explorar-ne les causes. Com veurem més endavant, la diferència és que en aquests materials l'energia d'interfície superconductor/normal no és positiva sinó negativa i, com veurem, aquesta diferència té dramàtiques conseqüències en el comportament magnètic dels materials.

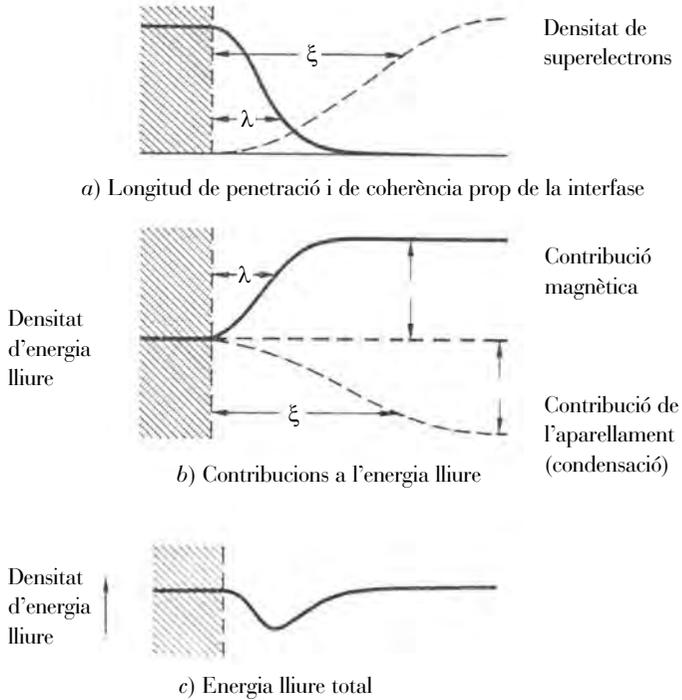


FIGURA 2. *Energia d'interfície a la frontera entre una regió normal i una de superconductora de tipus II ($\xi \ll \lambda$) en un metall. a) Longitud de penetració del camp magnètic i de coherència prop d'una interfície, b) contribucions a l'energia lliure prop d'una interfície, i c) balanç net d'energia d'interfície en un superconductor de tipus II.*

Per a descriure i comprendre correctament les contribucions d'aquests investigadors, és convenient dedicar aquest apartat a repassar les propietats magnètiques dels superconductors.

Els materials superconductors es caracteritzen pel fet d'estar formats per parelles d'electrons condensats en un estat en el qual es mouen coherentment. Això implica que es mouen sense dissipar ener-

gia (resistència elèctrica nul·la) i que expulsen un camp magnètic del seu interior (efecte Meissner). En la figura 3 es mostra la corba d'imantació d'un material superconductor sotmès a un camp magnètic.

Molts metalls superconductors, en particular els elements, presenten diamagnetisme perfecte; és a dir, la imantació (M) del material sotmès a un camp magnètic és tal, que la inducció total al seu interior és nul·la. Si escrivim $B = \mu_0 H + \mu_0 M$, $B = 0$ a l'interior, implica que $M = -H$. En la figura 3 s'il·lustra $M(H)$ i es pot veure que $M(H)$ és lineal per a una certa regió de camps aplicats i amb pendent -1 . Aquesta és la resposta Meissner. Aquest comportament s'observa fins a un cert valor de camp aplicat (H_C , camp crític termodinàmic), on la imantació decau bruscament a zero quan, sota l'efecte del camp, el material transita a l'estat normal. Si retirem el camp abans d'haver arribat a H_C , recorrerem la corba $M(H)$ enrere de manera reversible.

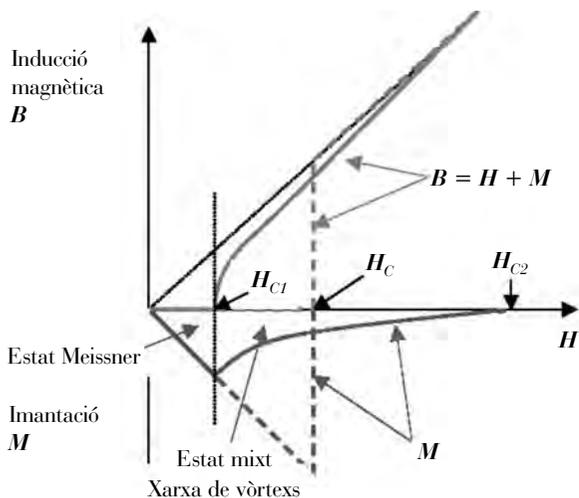


FIGURA 3. Imantació M i inducció magnètica induïda B d'acord amb el camp magnètic aplicat H per a un superconductor de tipus I—apantallament magnètic perfecte (línia discontinua)— i per a un superconductor de tipus II—apantallament parcial (línia contínua).

Hi ha altres materials, els que anomenàvem «bruts», en els quals la corba d'imantació és totalment diferent. Ara, en arribar a un camp aplicat H_{C1} (camp crític inferior), la imantació comença a decreixer de manera gradual, i el material no anul·la la seva imantació negativa fins a assolir un camp molt més gran H_{C2} (camp crític superior).

Abrikosov va entendre (1957) que aquest resultat es podria derivar de la mateixa teoria de G-L, resolent-la en el cas que l'energia superficial superconductor/normal fos negativa (tipus II, $\kappa > 1/\sqrt{2}$). La diferència rau en el fet que en un superconductor de tipus II, la resolució de les equacions de G-L porta a una solució en què, per a $H > H_{C1}$, hi ha entrada parcial de flux magnètic a l'interior del superconductor. Entrada que no es fa de manera homogènia, sinó que el flux magnètic està confinat en regions molt petites (diàmetre ξ) rodejades per vòrtexs de corrents (de diàmetre λ). A mesura que el camp aplicat augmenta, la densitat de vòrtexs augmenta fins al punt que se superposen per a $H \approx H_{C2}$ i s'arriba a l'estat normal.

Encara més, Abrikosov va preveure que aquests vòrtexs, que estan formats per corrents, han d'interactuar entre si. Com a resultat d'aquesta interacció clàssica, com la de dos imants de la mateixa polaritat, els vòrtexs es rebutgen i acaben allunyant-se entre si i ordenant-se en una xarxa (xarxa de vòrtexs). En aquest estat mixt (anomenat *estat mixt* o *de Shubnikov*), on a l'interior del superconductor hi ha regions amb camp magnètic i regions sense camp magnètic, la resistivitat pot ser nul·la o no. Ho veurem amb detall més endavant. Aquí, tan sols farem notar que, si un vòrtex —ja hem vist que està format per un cor on hi ha camp magnètic (i per tant allà el paràmetre d'ordre i la densitat de parells de Cooper són nuls) rodejat per una zona on circulen corrents— es mou, provocarà una variació local de flux magnètic i, en conseqüència, apareixerà dissipació d'energia, ja que els electrons del cor són normals. En aquestes condicions la resistivitat elèctrica a l'estat mixt del superconductor serà finita. Si, per contra, aconseguís que el vòrtex estigués lligat, ancorat en algun punt del material que li impedis el seu moviment, llavors podríem tenir un

superconductor a l'estat mixt i amb resistència elèctrica nul·la. Afortunadament, això és possible i aquesta habilitat és la que ens permet usar els superconductors en aplicacions pràctiques.

3. CONTRIBUCIONS DELS LAUREATS

3.1. TEORIA DE GINZBURG-LANDAU

Quan Ginzburg i Landau, als anys cinquanta, comencen a desenvolupar la seva teoria dels superconductors, hi ha ja un bon nombre de resultats clau que tenen a l'abast: 1) la resistència nul·la i l'efecte Meissner, 2) la superconductivitat és destruïda per un camp magnètic suficientment fort o pel pas de corrent, 3) un model de dos fluids reproduceix correctament algunes dades experimentals, i 4) el model que els germans London havien desenvolupat, i que ja permetia explicar per què un camp magnètic no penetra el superconductor. Queden, però, moltes coses inexplicades: la supressió de la superconductivitat per camps i corrents, l'existència d'una energia superficial associada a l'existència d'interfícies superconductor/normal, l'observació que el camp crític és diferent segons si tenim un material massiu o en forma de capa prima, etc.

Landau havia desenvolupat, a finals dels anys trenta, una teoria de les transicions de fase (de fet, Lev Landau va ser guardonat amb el Premi Nobel de Física el 1962). El seu punt de partida va ser que l'aparició d'un paràmetre d'ordre (Ψ) en una transició de fase implica una disminució de la simetria del sistema. Basant-se en consideracions de simetria, i en el fet que l'energia lliure d'un sistema, aquella que controlem amb paràmetres experimentals de pressió i temperatura (p , T), ha de ser contínua a la transició, Landau proposa que l'energia lliure (de Gibbs) d'un sistema s'ha de poder escriure com:

$$G(T, p) = G_0(T, p) + \alpha(T, p)|\Psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\Psi|^4 + \dots$$

Les raons de simetria i continuïtat de G a través de la transició imposen que el coeficient A s'hagi d'anul·lar a la temperatura crítica i canviar de signe, de manera que la forma més simple de α és: $\alpha(T, p) = \alpha(p)(T - T_C)$. Perquè l'energia tingui un mínim, cal que β sigui positiu.

Amb aquestes simples consideracions, ara es pot escriure l'energia lliure com:

$$G(T, p) = G_0(T, p) + \alpha(p)(T - T_C)|\Psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\Psi|^4 + \dots$$

Aquest model permet calcular la dependència del paràmetre d'ordre (la fracció d'electrons superconductors) en la temperatura i fins i tot preveure la discontinuïtat de la calor específica observada experimentalment a $T = T_C$. Malgrat tot, no permet incorporar variacions especials del paràmetre d'ordre. Aquesta dificultat sembla substancial, ja que el model de London preveu que la densitat de superelectrons ha de canviar en funció de la profunditat sota la superfície dels superconductors i, al mateix temps, sembla rellevant per a poder explicar per què els camps crítics varien segons quina sigui la geometria del superconductor. Aquest és el rerefons que va motivar Ginzburg i Landau a revisar, el 1950, la teoria que Landau havia desenvolupat l'any 1937. La manera de generalitzar-la va consistir a assumir que el paràmetre d'ordre $\Psi(r, \phi)$ és una funció complexa ($\Psi(r, \phi) = \Psi_0(r)e^{i\phi(r)}$) i que varia suaument de punt a punt dintre del superconductor. Això implica que a l'energia lliure ara s'hi haurà d'incloure un terme de la forma $|\nabla\Psi(r)|^2$, ja que la variació de $\Psi(r, \phi)$ implica un cost d'energia (cinètica).

En termes d'aquest paràmetre d'ordre, l'energia lliure pren la forma:

$$G(T, p) = G_0(T, p) + \alpha(T, p)|\Psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\Psi|^4 - (\hbar^2/2m^*)|\nabla\Psi(r)|^2$$

G-L incorporen la presència d'un camp magnètic (\mathbf{b}) ($\mathbf{b} = \nabla \times \mathbf{A}$) introduint el potencial vector \mathbf{A} i substituint $-i\hbar\nabla \rightarrow -i\hbar\nabla + (e^*\mathbf{A})$, on e^* i m^* són la càrrega i la massa dels portadors de càrrega en el sistema. Llavors l'energia lliure s'expressarà:

$$G(T, p) = G_0(T, p) + \alpha(T, p) |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 + (1/2 m^* [i\hbar \nabla + e^* A] \Psi)^2 + (b^2 / 2 \mu_0)$$

De minimitzar l'energia lliure respecte de les variacions de Ψ i A , s'obtenen les anomenades *equacions de G-L*:

$$\frac{1}{2m^*} (i\hbar \nabla + e^* A)^2 \Psi + \alpha \Psi + \beta |\Psi|^2 \Psi = 0 \quad [1]$$

$$-\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \frac{i\hbar e^*}{2m^*} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) + \frac{(e^*)^2}{m^*} |\Psi|^2 \mathbf{A} \quad [2]$$

La segona equació [2] té la mateixa forma que l'equació que dona la densitat de corrent en física quàntica. La primera [1], excepte pel terme quadràtic en Ψ , és anàloga a l'equació de Schrödinger per a una partícula de massa m^* i càrrega e^* . És interessant reflexionar sobre l'equació [1]. Atès que no podem mesurar el valor absolut de $|\Psi|^2$, el valor de la massa m^* és arbitrari i és, per tant, poc rellevant. Què passa, però, amb e^* ? Ginzburg afirma que des del principi li va semblar que e^* podia ser una càrrega efectiva que podria ser diferent de la càrrega d'un electró lliure, de la mateixa manera que la massa efectiva dels electrons ho és en molts materials. Landau, però s'oposava a aquesta idea: ell considerava fora de lloc una càrrega efectiva que pogués variar amb la temperatura, pressió etc. i, per tant, en el seu escrit de 1950 (l'únic que van signar conjuntament) escriu: «no hi ha raó per a pensar que e^* difereixi de la càrrega d'un electró». Ginzburg, però, segueix pensant que, per a explicar alguns valors experimentals que es deriven de la mateixa teoria de G-L (tal com el camp crític inferior, la longitud de penetració i el paràmetre κ), seria convenient que $e^* \approx (2-3)e$, on (e) és la càrrega de l'electró lliure. Finalment, en un article que Ginzburg publica tot sol sis anys després (1956), afirma: «l'acord amb les dades experimentals milloraria substancialment si es pogués prendre $e^* \approx (2-3)e$ », tot i que deixava explícit que «Landau no compartia aquesta opinió».

La formulació de la teoria BCS, on es mostra que $e^* = 2e$ a causa de la formació de parelles, va aparèixer l'any següent.

Ginzburg es reconeix ell mateix entristit per no haver sabut rebatre Landau, tot dient-li que «la càrrega efectiva pot ser diferent de la de l'electró lliure, però constant; és a dir, independent de qualsevol canvi de temperatura o pressió», que eren les objeccions que Landau posava. El que és cert, però, és que l'any 1956, entre tots els qui coneixien les idees i el paper de Ginzburg, ningú no va suggerir que l'explicació més raonable i simple era la formació de parelles d'electrons.

Les equacions de G-L són capaces d'explicar molts fenòmens i resultats experimentals. Per exemple:

a) Si suposem per un moment que el paràmetre d'ordre no varia $\Psi(r, \phi) = |\Psi_\infty|$, llavors de l'equació [2] resulta que:

$$j = -\frac{(e^*)^2}{m^*} |\Psi_\infty|^2 A,$$

que és just l'equació constitutiva proposada per London el 1935 i que ens mostra l'origen del diamagnetisme. És similar al diamagnetisme atòmic (diamagnetisme de Landau) però amb la diferència que mentre que en aquell cas la petita magnitud de l'àtom (l'extensió espacial de les funcions d'ona atòmiques) fa que el diamagnetisme atòmic que es mesura sigui molt feble, si la funció d'ona Ψ representa tot un metall, llavors el senyal serà ordres de magnitud més gran. De l'expressió anterior es deriva que

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \left[\frac{1}{\lambda(T)^2} \right] \mathbf{H}, \text{ on } \lambda = \sqrt{\frac{m^*}{\mu_0 n_s^* (e^*)^2}}$$

és la *longitud de penetració del camp* i $n_s^* = |\Psi_\infty|^2$. Si posem: $m^* = 2m$, $e^* = 2e$ i $n_s = n/2$, on n és la densitat d'electrons lliures en el sistema, resulta:

$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n e^2}}$$

Fixem-nos que, si n és de l'ordre del nombre d'electrons de conducció en un metall ($\sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$), llavors λ és d'uns 100 nm. Aquesta és una distància petita i que demostra que el camp

magnètic és pràcticament exclòs totalment de l'interior del material.

b) A l'equació 1a, el terme en gradient $(-i\hbar\nabla + e^* A)^2\Psi$ implica un terme positiu a l'energia i que és més important com més gran sigui el gradient de $\Psi(r)$, és a dir, com més ràpida sigui la variació espacial de $\Psi(r)$. La longitud característica d'aquesta variació s'anomena *longitud de coherència* (ξ). Una conseqüència de l'existència de la longitud de coherència és que la frontera entre un material superconductor i un de normal no pot ser abrupta, ja que llavors la contribució energètica del terme de gradient seria molt gran. Dit en altres paraules, la densitat de superelectrons $|\Psi(r)|^2$ no pot variar brusquement, sinó que augmenta gradualment des de la regió normal fins a la regió superconductora en una distància característica ξ . En els superconductors anomenats *d'alta temperatura*, ξ és de ~ 1 nm.

c) Es pot veure que tant λ com ξ varien amb la temperatura com

$$\sqrt{\left(\frac{T_c}{T_c - T}\right)},$$

de manera que el seu quocient, és a dir, el paràmetre de Ginzburg-Landau, $\kappa = \lambda(T) / \xi(T)$, és independent de la temperatura.

d) En aquest punt hem de fer referència a l'energia d'interfície entre un superconductor i un metall normal. Ja hem dit que ξ mesura la distància sobre la qual la densitat d'electrons superconductors varia apreciablement. Si l'energia de l'estat superconductor és més petita que la de l'estat normal —i ho ha de ser, altrament el sistema no condensaria a l'estat superconductor—, llavors la zona en la qual, en presència d'un camp magnètic, aquest penetra en el si del superconductor (λ) és una zona d'energia positiva, ja que el fet de crear els corrents d'apantallament i excloure el camp de l'interior costa energia. D'altra banda, la zona de gruix ξ , on la densitat d'electrons varia, és una zona d'energia negativa, ja que condensar electrons comporta una disminució de l'energia del sistema. Així, doncs, el balanç net d'energia a la interfície serà proporcional a la diferència $\sim(\xi - \lambda)$. Més exactament, la teoria de G-L preveu que l'energia superficial neta serà

$$\left(\frac{\xi}{\sqrt{2}} - \lambda\right) \mu_0 \mathbf{H}_c^2 / 2,$$

on \mathbf{H}_C és el camp necessari per a suprimir la superconductivitat (camp crític termodinàmic o camp de condensació). Si $\lambda < \xi/\sqrt{2}$, llavors l'energia superficial és positiva i el sistema intentarà minimitzar les interfícies que separen les zones superconductores de zones normals. En termes del paràmetre de Ginzburg-Landau, això succeeix per a $\kappa < 1/\sqrt{2}$ i correspon, doncs, a superconductors de tipus I. Al contrari, si $\lambda > \xi/\sqrt{2}$, llavors l'energia superficial és negativa i el sistema, en presència de camp magnètic, intentarà maximitzar les interfícies entre regions normals i superconductores. En la figura 2 es mostra esquemàticament la variació de l'energia superficial en un superconductor de tipus II.

Per a acabar, val a dir que el treball de Ginzburg-Landau publicat l'any 1950 va passar força desapercbut i que fou rebut amb un cert escepticisme, probablement pel fet que, malgrat la capacitat predictiva de la teoria, aquesta no donava una interpretació microscòpica de què era el paràmetre d'ordre. No va ser fins després de la publicació de la teoria microscòpica BCS l'any 1957 i que Gorkov fos capaç de demostrar, l'any 1959, que les dues equacions de Ginzburg-Landau es deriven de la mateixa BCS, que el valor de la contribució dels científics russos va ser plenament apreciada.

3.2. L'ESTAT MIXT I ELS SUPERCONDUCTORS DE TIPUS II

Quan la teoria de Ginzburg-Landau va ser publicada, el 1950, alguns dels paràmetres i quantitats que hi intervenen no eren ben compresos i es van fer molts esforços experimentals per explorar les seves prediccions i limitacions. Entre altres, i per l'impacte posterior que van tenir les seves recerques, cal assenyalar els experiments de N. V. Zavaritski, que estava mesurant com canviava el caràcter de la transició a l'estat superconductor en capes primes, segons el seu gruix. Amb aquesta finalitat, mesurava la resistivitat

elèctrica en funció del camp magnètic aplicat i la seva histèresi. En general, els resultats coincidien bé amb les prediccions teòriques del model de G-L. En un cert moment, Zavaritski va fer créixer capes evaporant el metall a molt baixa temperatura i per sorpresa va observar que els camps crítics mesurats discrepaven clarament de les prediccions teòriques.

Ara sabem que el creixement a baixa temperatura porta a fabricar metalls amorfs i que Zavaritski acabava de descobrir el que posteriorment s'anomenaria un *superconductor de tipus II*. El fet és que Zavaritski i Abrikosov van discutir molt sobre aquest sorprenent resultat i van imaginar que, tal vegada, l'aproximació de $\kappa \ll 1$ (és a dir, longitud de penetració de camp molt més petita que la longitud de coherència) podria no ser vàlida per a aquests materials amorfs. De fet, d'acord amb la teoria de G-L, si $\kappa > \sqrt{1/2}$, llavors l'energia superficial hauria de ser negativa i, potser, la transició de fase podria ser de segon ordre, tal com Zavaritski observava. A la vista d'aquests resultats experimentals, Abrikosov es va dedicar a calcular la dependència del camp crític amb el gruix de les capes, en el cas en què $\kappa > 1/\sqrt{2}$. La teoria semblava descriure les dades correctament. En un article científic que publicà el 1952, Abrikosov deia: «a part dels superconductors ordinaris que tots coneixem, existeixen en la naturalesa substàncies superconductores d'un altre tipus, que proposo anomenar superconductors del segon grup» (avui els anomenem superconductors de tipus II). La divisió entre les dues famílies la marca la relació entre κ i el seu valor crític $1/\sqrt{2}$.

Abrikosov va continuar la seva recerca i investigà el comportament magnètic de superconductors amb $\kappa > \sqrt{1/2}$. El que va trobar es resumeix fàcilment. Era clar que la superconductivitat no podia existir sota camps magnètics superiors a un cert valor $H_{C2} = H_C \kappa \sqrt{2}$ (o camp crític superior). Quan el camp magnètic aplicat segueix disminuint per sota de H_{C2} , llavors petites regions no superconductores comencen a nuclear en el si del superconductor. Per a aquest valor de camp aplicat el material ja no és superconductor en el sentit que al seu interior hi ha regions que són normals i que en aquestes regions hi pot haver flux magnètic. Més

precisament, Abrikosov va obtenir que en aquesta regió de camps, el paràmetre d'ordre $\Psi(r)$, el camp magnètic i els corrents varien de manera periòdica. Aquesta variació periòdica del camp magnètic en el si del superconductor minimitza la seva energia i la va anomenar «estat mixt». La figura 3 il·lustra el procés d'imantació d'un material superconductor.

Abans de prosseguir amb el desenvolupament d'Abrikosov, considero interessant revisar com el seu entorn rebia aquesta nova proposta. De manera particular és rellevant l'actitud de Landau, un científic d'enorme personalitat i un fort caràcter que dominava, en algun sentit, la física —i els físics— de l'època a Moscou. La qüestió és que, estant Abrikosov convalescent d'una malaltia que el va tenir al llit durant uns quants mesos, va rebre la visita de Landau. Abrikosov li va voler explicar la seva idea de l'estat mixt, «on hi hauria zones no superconductores rodejades de circulació de corrents (vòrtexs), i que serien com petits filaments de camp magnètic en el si del material superconductor». La resposta de Landau va ser contundent: «una persona malalta no pot ser molestada. Quan es recuperi, ja en parlarem. Adéu». No el va visitar més.

Abrikosov va recobrar la salut i va retornar a l'Institut de Física Teòrica de Moscou, on treballava. Sense èxit va intentar tornar a parlar amb el seu cap Landau. Novament va guardar els càlculs i papers al calaix.

Malgrat tot, la idea que ell tenia era simple i no semblava no raonable. Analitzant les solucions que va obtenir per a \mathbf{H} per sota de \mathbf{H}_{C2} , trobava que, en un pla perpendicular al camp magnètic aplicat, hi ha punts on el paràmetre d'ordre Ψ es fa zero i la fase (ϕ) de Ψ varia en 2π . L'origen d'aquesta variació està contingut en les equacions de G-L. Recordem que en aquestes equacions el potencial vector \mathbf{A} i la fase ϕ del paràmetre d'ordre apareixen en la combinació:

$$\mathbf{A} - \left(\frac{\hbar}{2e}\right) \nabla \phi$$

Sent així, si imaginem una situació en què el camp magnètic a l'interior del superconductor fos constant, llavors, posat cas que $\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$, el potencial vector ha d'augmentar gradualment amb

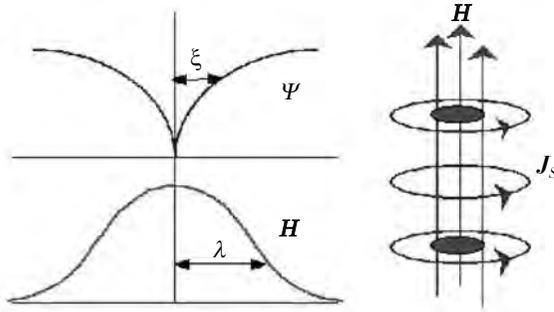


FIGURA 4. Estructura d'un vòrtex. A l'esquerra es pot veure com varia el paràmetre d'ordre Ψ i la longitud de penetració λ en els encontorns del cor d'un vòrtex. És una distància de l'ordre de λ que els corrents superconductors (J_s) circulen. A la dreta es mostra un esquema del vòrtex. El flux magnètic que generen els corrents (J_s) és un quàntum de flux ($2,07 \cdot 10^{-7} \text{ Gcm}^2$).

la distància. Si l'energia lliure no pot créixer d'aquesta manera, significa que l'augment de A és compensat per salts de fase ($\nabla\phi$). Naturalment la fase sols pot canviar en 2π (o en múltiples enters). La solució resultant és tal, que hi ha punts del material on hi ha una singularitat del paràmetre d'ordre i on $\Psi(r)$ s'anul·la, i on la fase ϕ de $\Psi(r)e^{i\phi}$ canvia en un factor 2π . Un canvi de fase correspon, d'acord amb les equacions de G-L, a una circulació de corrents entorn de la singularitat. Aquesta solució és del tipus vòrtex, on una circulació de corrents encercla un cor on el paràmetre d'ordre —i, per tant, la densitat de superelectrons— és nul. Els corrents circulants, al mateix temps generen i encerclen un flux magnètic. Es pot veure que, atès que el canvi de fase al llarg d'una línia que encercla la singularitat ha de ser just 2π (o un múltiple d'aquest) i, en conseqüència, la magnitud dels corrents circulants està fixada, també ho estarà el flux magnètic generat. Aquesta quantitat s'anomena *fluxó* o *quàntum de flux* (Φ_0). En la figura 4 es mostra l'estructura d'un vòrtex.

Tal com ja he indicat, l'actitud *poc* receptiva de Landau va aconsellar Abrikosov de guardar els resultats. L'any 1955, Feynman va publicar un treball on estudiava la dinàmica d'un fluid amb vis-

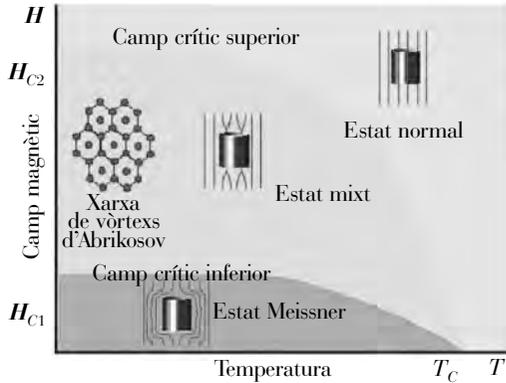


FIGURA 5. Diagrama de fases (camp magnètic aplicat - temperatura) corresponent a un superconductor de tipus II. A l'estat Meissner el flux magnètic és totalment apantallat de l'interior dels superconductors per uns corrents superficials que circulen a una profunditat λ . Abrikosov va proposar que en l'estat mixt, el flux magnètic penetra parcialment en forma de tubs de flux (vòrtexs) i que aquests tubs s'ordenen formant una xarxa. En l'estat normal el flux magnètic penetra homogèniament el superconductor.

84

cositat nul·la (^4He superfluid sotmès a rotació). Va demostrar que es podien formar vòrtexs elementals de fluid. Landau, que sempre havia estat interessat per aquest tema, immediatament va comprendre que aquesta era la bona solució a un problema que ell mateix (en cooperació amb E. M. Lifshitz) havia abordat anteriorment i al qual havia trobat solucions poc satisfactòries.

Abrikosov va comprendre que aquella era també la seva oportunitat: «Per què acceptar solucions singulars en ^4He superfluid i no acceptar-les en un superconductor?» Landau va ser receptiu a l'observació, Abrikosov va treure els papers del calaix i Landau va donar el vistiplau a la idea de vòrtexs en el superconductor i a l'estat mixt format per filaments de flux magnètic rodejat de corrents. Abrikosov va demostrar que la repulsió entre aquests hauria de provocar-ne l'ordenament en una xarxa de vòrtexs (xarxa d'Abrikosov). Aquests resultats van ser finalment publicats el 1957 a la revista russa *JETP*. La figura 5 mostra el diagra-

ma de fases (temperatura - camp aplicat) per a un superconductor de tipus II, tal com va proposar Abrikosov.

Val la pena notar que just al mateix any (1957), Bardeen, Cooper i Schriffer van publicar la («seva») teoria BCS i, davant la força d'aquesta teoria microscòpica, la contribució d'Abrikosov va passar força desaperebuda. La situació, però, tornà a canviar el 1961, quan es publicà que el Nb_3S és superconductor i té un camp crític de 100 kOe; aviat es van començar a fer bobines amb fils d'aquest metall. Aquest resultat va captar l'interès sobre els aliats superconductors.

Tal vegada per això, en molts laboratoris del món es van tornar a revisar amb detall els cicles d'histeresi de molts superconductors i es van anar comparant amb les prediccions teòriques. Als EUA, Goodman havia publicat un article (1961) en el qual descriu l'estructura magnètica dels superconductors d'energia d'interfície negativa. Desconeixedor dels treballs d'Abrikosov, va proposar un model en què imaginava que en l'estat mixt el superconductor estava format per una estructura laminar de zones superconductores i no superconductores. Les dades experimentals estaven en acord qualitatiu amb les prediccions. El que és remarcable, i per això ho recullo aquí, és que l'any següent, el 1962, Goodman escriu un article en el qual compara les dades experimentals amb les prediccions del seu propi model i les d'Abrikosov —que probablement ja li havien arribat. Conclou en aquest article que el seu model no és el bo, i que el d'Abrikosov sí. Tal com indica Abrikosov mateix, l'objectiu (inaudit) d'aquest segon article de Goodman era «demostrar que la seva pròpia teoria era més dolenta que la d'Abrikosov». Certament, és una actitud poc comuna.

Cal assenyalar que, malgrat l'excel·lent acord entre les dades experimentals de nombrosos laboratoris amb la teoria desenvolupada per Abrikosov, la idea de l'estat mixt i la xarxa de vòrtexs va ser una idea que amb moltes dificultats es va obrir camí. Fins a l'any 1966, quan Uwe Essmann i Hermann Träuble van publicar la primera imatge (fig. 6) d'una xarxa de vòrtexs en Pb-In obtinguda amb decoració magnètica, no es van acceptar plenament les notables prediccions d'Abrikosov.

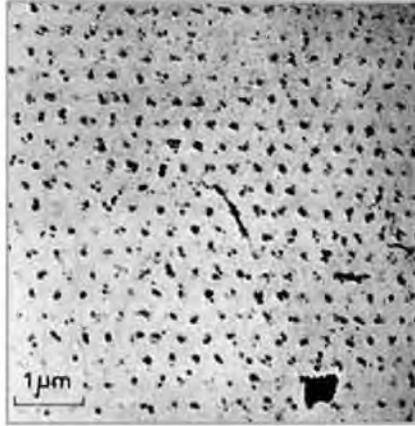


FIGURA 6. Xarxa de vòrtexs en *Pb-In*, generada a 1,1 K i 195 Oe. Primera imatge d'una xarxa de vòrtexs feta per U. Essmann i H. Trauble, de l'Institut Max-Planck, Stuttgart (*Physics Lett.*, núm. 24 A, 1967, p. 526) i obtinguda amb la tècnica de decoració magnètica de Bitter.

86

Avui, la xarxa de vòrtexs s'ha vist amb molt diverses tècniques experimentals, i la seva existència, propietats elàstiques i dinàmiques han estat estudiades amb tot detall. Notem que un vòrtex en un superconductor, tal com el descriu Abrikosov, és un objecte electromagnètic que s'ordena i forma una xarxa de manera anàloga a com s'ordenen els àtoms en un sòlid cristal·lí. Cal, doncs, preveure que aquesta xarxa d'objectes sense massa tingui propietats semblants a les xarxes cristal·lines. En particular, que en una certa regió de temperatura i camp magnètic aplicat, aquesta xarxa es pugui fondre i transformar en un líquid desordenat de vòrtexs o bé que en la seva fase sòlida pugui tenir defectes com ara dislocacions, mosaïcitat, defectes puntuals, etc. La presència de defectes en el material superconductor haurà d'afectar també de manera important la xarxa de vòrtexs, tant la seva topologia com la seva dinàmica (ho veurem més endavant).

Per què la presència de defectes en el material superconductor ha d'afectar la distribució de vòrtexs del superconductor? La raó és simple, i es deriva del mateix concepte de vòrtex. Tal com hem assenyalat, el vòrtex té un nucli o cor de mida ξ , on el paràmetre d'ordre s'anul·la. Això vol dir que allà hi ha electrons normals. Suprimir en aquesta regió la formació de parelles té un cost energètic. Naturalment, si hi ha una regió defectuosa del material on les propietats superconductores ja estan deprimides, transformar-la en normal a l'estat mixt, tindrà un cost d'energia menor. Així, doncs, quan en aplicar un camp magnètic comencin a formar-se vòrtexs, el superconductor minimitzarà la seva energia nucleant-los allà on hi ha defectes.

Un superconductor de tipus II, a l'estat mixt està, doncs, parcialment penetrat pel camp magnètic que, en forma de tubs de flux magnètic, constitueix una xarxa més o menys regular. Si es fa circular un corrent elèctric pel superconductor, llavors aquest corrent exercirà una força sobre els tubs de flux. Si el vòrtex es mou, dissiparà energia. Si no ho fa, no hi haurà dissipació d'energia i el superconductor seguirà tenint resistència zero com tenia a l'estat Meissner, quan no havia entrat flux al seu interior. Si en el material hi ha defectes on el flux magnètic ha nucleat favorablement, aquest tub de flux estarà en un mínim local d'energia, ja que fer-lo moure implica transformar una altra regió del material en superconductora. Així, doncs, el vòrtex estarà ancorat en aquesta posició. Si la força exercida pel corrent no és suficientment gran per a vèncer la força que l'ancora, el vòrtex no es mourà i el corrent circularà sense dissipar.

Des d'un punt de vista pràctic, aquesta és la gran diferència entre els superconductors de tipus I i els de tipus II. En els primers, l'entrada de flux implica la supressió de l'estat de resistència nul·la. En els segons, podem tenir entrada de flux i, malgrat tot, tenir resistència zero. És just aquesta propietat, la que fa els superconductors de tipus II extraordinàriament rellevants per a la tecnologia.

És ben evident que la contribució d'Abrikosov a la comprensió dels superconductors va ser extraordinària. Cal, però, recordar que el món occidental no va reconèixer la seva contribució fins molt després, a mitjan anys seixanta, quan als EUA es van descobrir ma-

terials amb camps crítics molt elevats. La guerra freda va impedir que molts científics de l'Oest miressin les idees que estaven naixent i creixent a l'Est, probablement en detriment de tothom.

3.3. ^3He . UN SUPERFLUID ANISÒTROP

El descobriment de la superfluïdesa del ^3He va ser en certa manera una mica fortuït. D. Osheroff (Universitat de Cornell) estava interessat a estudiar si, solidificant ^3He a baixa temperatura i alta pressió, es podria arribar a tenir un estat en què els espins nuclears del ^3He s'ordenessin com ho fan els espins atòmics en un ferromagnet. Amb aquesta idea volien mesurar la susceptibilitat magnètica nuclear del ^3He sòlid, usant un equip de ressonància magnètica nuclear (NMR). En primer lloc havien de refredar l'heli, aplicar-hi pressió i congelar-lo. L'experiment consistia a comprimir l'heli a ritme constant i mesurar simultàniament la temperatura del ^3He i la seva pressió segons el temps. La sorpresa va ser que, a temperatures per sota de 2,7 mK, la pressió interna no variava de manera monòtona amb el temps, sinó que a unes certes temperatures ($A \approx 2,65$ mK i $B \approx 1,8$ mK) es produïen discontinuïtats clares en el ritme de variació de la pressió. Els autors van publicar els resultats a *Phys. Rev. Lett.*, a l'abril de 1971. En aquest article, suggerien que havien «observat la formació d'una nova fase de ^3He sòlid per sota de 2,7 mK». En cap moment no esmentaven que la transformació es produís en heli líquid!

Van seguir amb la idea d'estudiar el sòlid amb NMR. L'espectre és complex però mirant amb detall van observar que la intensitat d'algunes ressonàncies canviava bruscament a les temperatures (A i B) on s'havien observat els canvis de ritme de pressió. La sorpresa va ser màxima quan es van adonar que el senyal de l'espectre que canviava a la temperatura del punt B era precisament un senyal molt petit que imaginaven que venia de traces de líquid que quedaven en el procés de compressió. Així, doncs, en B alguna cosa li passava al líquid, no al sòlid. Poc després, Lee va

suggerir nous experiments de NMR que van demostrar que també en el punt *A* es produïen modificacions a l'espectre del líquid. Quedava clar que les transformacions *A* i *B* es produïen en el líquid. Però, quines i per què? Van publicar els resultats a *Phys. Rev. Lett.*, a l'octubre del mateix 1971, sense comentar que el que havien vist podia ser el reflex d'una superfluidesa com la BCS. Richardson es va acostar a A. Leggett (llavors era a Sussex). Leggett es va adonar que el fet que s'observessin les transicions *A* i *B* tant en experiments que impliquen canvis de volum com en aquells que impliquen la resposta magnètica, indicava que els graus de llibertat magnètics (*espins nuclears*) i els orbitals no poden estar desacoblats: «una forma possible seria que en els punts *A* i/o *B* el sistema intentés formar algun tipus de molècules diatòmiques». Però això afecta tot el líquid, ja que tant *A* com *B* sembla que són propietats termodinàmiques del sistema. Llavors, «si es formen parelles, aquestes afecten tot el líquid, i en la transició es trenca alguna simetria macroscòpica col·lectiva. A baixa temperatura l'orientació dels espins nuclears està correlacionada amb el moment angular de la parella d'àtoms. Les transicions observades en *A* i *B* són el reflex de diferents tipus de correlacions».

A. Leggett no tan sols va completar la descripció teòrica del fenomen, sinó que va proposar els experiments necessaris per a confirmar les prediccions de la teoria. A. Leggett escriu: «L'heli 3 superfluid és probablement el sistema més complex que hi ha en la física de la matèria condensada. Les parelles de Cooper aquí tenen una estructura interna, i aquesta estructura és diferent en les fase *A* i *B*. Si tenim dos àtoms de ${}^3\text{He}$ i els refredem i han de formar una parella de Cooper, han de decidir si orientaran els seus espins paral·lels o antiparal·lels al moment angular. La diferència en energia entre aquests estats és molt petita, d'uns pocs nK, i la podríem oblidar. Però com que el sistema condensarà en un estat de Bose, on totes les parelles ocuparan el mateix estat, haurem de multiplicar aquella energia tan petita per alguna cosa d'aproximadament 10^{23} . Això és el que fa fascinant el sistema. Una energia tan petita amplificada tan espectacularment!»

4. CONCLUSIONS I ENTORN

De l'exposició anterior cal concloure que el procés d'elaboració d'una teoria de la superconductivitat i superfluidesa ha estat un exemple de treball molt llarg i que ha requerit l'esforç de molts científics. Els primers descobriments van ser conseqüència de progressos extraordinaris en enginyeria criogènica, els quals van obrir una finestra a regions inexplorades. Els van seguir experiments metòdics que van permetre definir les característiques fonamentals dels superfluids. Després, les eines teòriques que permeteren donar una descripció microscòpica d'aquests fenòmens. Ni els materials superconductors estan tots descoberts ni es comprenen encara avui tots els detalls de la complexa física d'aquests sistemes. Malgrat això, la contribució dels tres físics guardonats enguany ha estat clau per al progrés i coneixement dels superfluids.

La teoria de Ginzburg-Landau ha estat rellevant en molts àmbits de la física, des de la física de la matèria condensada fins a la física de partícules. És una eina fenomenològica i conceptual usada quotidianament per a descriure les propietats dels materials superconductors.

Abrikosov ha descrit amb detall les propietats del que avui anomenen *superconductors de tipus II*. Una família de materials que ja tenen un gran impacte en la vida quotidiana i que, amb el descobriment dels anomenats *superconductors d'alta temperatura crítica*, ha rellançat la recerca i desenvolupament de nous materials superconductors.

Leggett ha proporcionat una descripció acurada d'un problema complex, i les eines conceptuais que ha introduït avui troben camp d'aplicació en camps de la física tan allunyats com són els cristalls líquids o la cosmologia.

No és aquest el lloc per a discutir sobre perspectives en els diferents àmbits de treball abordats pels premiats, però sí que val la pena indicar que el coneixement generat per aquests científics afecta i en certa manera guia la recerca que es fa en molts llocs del món. A Catalunya, en concret, la recerca i el desenvolupament de nous materials superconductors és una activitat que involucra un bon

nombre d'investigadors i mobilitza una quantitat important de recursos econòmics. L'estímul de la necessitat d'una gestió més eficient i segura de l'energia ha fet que grups de recerca de l'Institut de Materials de Barcelona (ICMAB), per exemple, hagin desenvolupat sistemes de seguretat superconductors per a xarxes de distribució de corrent que estiguin desenvolupant cintes conductores amb resistència nul·la (superconductores) per a un transport sostenible d'energia, o bé components per a comunicacions fotòniques més ràpides. L'activitat no es redueix certament a l'ICMAB, sinó que també integra grups d'investigadors de la Universitat de Barcelona capaços de fer créixer capes nanomètriques d'aquests materials, o de la Universitat Politècnica, que desenvolupen dispositius per a telecomunicacions, o bé de la Universitat Autònoma de Barcelona, que posen al punt eines de càlcul per a noves aplicacions dels materials superconductors. Aquesta activitat desborda el marc acadèmic i involucra empreses del nostre entorn, capaces de contribuir a la fabricació o a l'explotació d'alguns dels productes desenvolupats. Tots ells es nodreixen de les aportacions dels premis Nobel de Física del 2003.

91

5. REFERÈNCIES I ALTRES LECTURES

- ABRIKOSOV, A. A. «My years with Landau». *Physics Today* (gener 1973), p. 56.
- CRABTREE, G. W.; NELSON, D. R. «Vortex physics in high-temperature superconductors». *Physics Today* (abril 1997), p. 38.
- GEBALLE, T. H. «Superconductivity: from physics to technology». *Physics Today* (octubre 1993), p. 52.
- GINZBURG, V. L. «Landau's attitude towards physics and physicists». *Physics Today* (maig 1989), p. 54.
- LUBKIN, G. B. «Nobel Prize in Physics to Lee, Osheroff and Richardson for discovery of superfluidity in ^3He ». *Physics Today* (desembre 1996), p. 17.
- SCHRIEFFER, J. R. «Macroscopic quantum phenomena from pairing in superconductors». *Physics Today* (juliol 1973), p. 23.
- «Superfluids and superconductors: quantum mechanics on a ma-

- croscopic scale». A: *Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2003* [en línia]. <<http://www.kva.se>>
- TILLEY, D. R.; TILLEY, J. *Superfluidity and Superconductivity*. Bristol: IOP Publishing, 1990.
- WHITE, R. M.; GEBALLE, T. H. *Long range order in solids*. Nova York: Acad. Press, 1979.

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2003
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE MEDICINA
CONCEDIT A
PAUL C. LAUTERBUR
I PETER MANSFIELD,
A CÀRREC DE
JAUME GILL,
DE L'INSTITUT DE DIAGNÒSTIC
PER LA IMATGE DE L'HOSPITAL
VALL D'HEBRON**

**EL NOBEL DE MEDICINA 2003 O EL RECONeixEMENT
DE L'APORTACIÓ DE LA RESSONÀNCIA MAGNÈTICA
AL DIAGNÒSTIC MÈDIC**

El Premi Nobel de Medicina del 2003 s'ha adjudicat al bioquímic nord-americà Paul Lauterbur i al físic anglès Peter Mansfield per la seva contribució a fer possible l'aplicació al diagnòstic mèdic de la tecnologia de la ressonància magnètica (RM).

En aquests dos científics es vol representar el reconeixement a tots els investigadors que, des del descobriment del fenomen de la ressonància magnètica nuclear, han dedicat el seu esforç per dotar el món mèdic d'una de les tècniques de diagnòstic per la imatge més útils de què mai s'ha disposat.

La ressonància magnètica nuclear ha revolucionat de manera espectacular el món del diagnòstic per la imatge en els últims vint anys:

— La possibilitat d'obtenir imatges de l'interior de l'organisme sense el risc inherent a les radiacions ionitzats en no tenir res a veure amb RX ni radioactivitat.

— El fet de poder-se dirigir amb procediments informàtics a qualsevol indret del cos.

— El fet de poder obtenir d'un mateix teixit diversos tipus d'informació i poder potenciar la imatge amb més d'un paràmetre, permet una aproximació diagnòstica més bona.

— La seva potencialitat diagnòstica en poder detectar canvis histoquímics molt abans que es converteixin en canvis morfològicament detectables, fa possible els diagnòstics en fases molt incipients.

— La sensibilitat al moviment permet obtenir imatges vasculars sense la necessitat d'injectar substàncies de contrast.

Aquestes són un exemple de les nombroses credencials de presentació de la ressonància magnètica en la seva aplicació al món mèdic. Però totes queden minimitzades davant la no-evidència encara d'efectes nocius en el seu ús, sempre que es respectin les normes orientatives indicades per les institucions internacionals que vetllen per l'ús clínic d'aquesta tecnologia.

La ressonància magnètica nuclear es fonamenta en una propietat que tenen els nuclis atòmics amb un nombre imparell de protons i/o un nombre imparell de neutrons, els quals, en ser col·locats sota un potent camp magnètic, absorbeixen energia electromagnètica.

Un dels nuclis que presenta aquesta propietat és el més elemental: el protó o nucli d'hidrogen (H-1). Afortunadament, és el nucli més abundant en l'organisme humà, i les imatges de ressonància magnètica d'ús habitual en la clínica són imatges que s'obtenen dels nuclis de H (fig. 1).

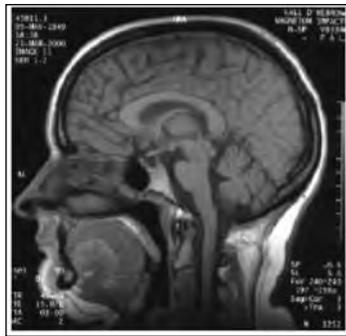


FIGURA 1. Imatge de RM en el pla mitjà sagital del crani de 4 mm de gruix. Les diverses tonalitats de grisos que configuren la imatge provenen dels nuclis de H. Centre IDI-RM de l'Hospital Universitari Vall d'Hebron, de Barcelona.

El fonament de l'obtenció de les imatges és molt senzill: quan ens posem sota un camp magnètic potent, els nuclis de H del cos poden absorbir energia electromagnètica de la banda de les radioones a freqüències concretes que depenen del camp magnètic efectiu en el qual estan sotmesos (d'aquest efecte se'n diu «entrar en ressonància»). Una vegada han absorbit aquesta energia la lliuraran al mitjà (aquest efecte és anomenat «relaxació»). En la relaxació s'indueix un senyal elèctric en una antena receptora que ser-

veix per a fer la imatge (imatge RM: IRM). També es pot aprofitar el senyal de relaxació per a fer anàlisis espectromètriques (espectrometria RM: ERM) i, actualment, imatges metabòliques.

Podem representar tot el procés en l'esquema de la figura 2.

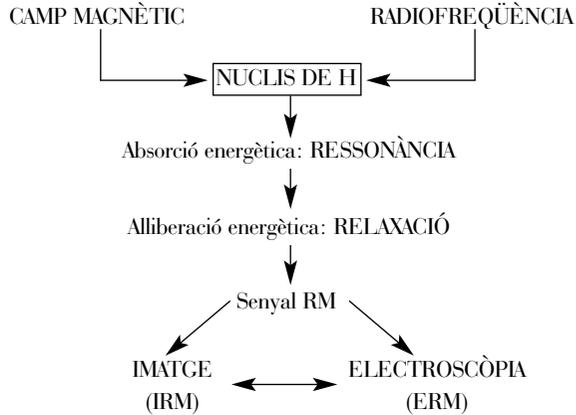


FIGURA 2. Esquema de l'obtenció de les imatges (IRM) en l'ús clínic de la RM.

Cal, doncs, assenyalar que els elements a què se sotmet el cos són el camp magnètic (com el de la Terra, però unes cent mil vegades més potent en funció de l'imant) i una emissió d'ones de ràdio d'elevada potència.

També s'ha d'assenyalar que l'energia de les radioones que rep el cos és del mateix ordre de magnitud que la que ja utilitza en els moviments de les seves molècules. Per altra banda, el nucli de H que ha absorbit la radioona es troba amb un excés energètic, i en el procés de relaxació tindrà més o menys facilitat de lliurar l'energia al mitjà en funció del tipus de molècula de la qual forma part. Així, doncs, ja s'entén que estudiant el senyal captat a l'antena receptora tindrem informació del mitjà i no tan sols de la quantitat de nuclis de H que han entrat en ressonància. Això permet tenir di-

verses informacions sobre el teixit, és a dir, potenciar la imatge en diversos paràmetres de la relaxació (facilitat en la relaxació, sincronisme...). Aquesta possibilitat de potenciació de les imatges permet una aproximació tissular més gran i marca una diferència fonamental amb les tècniques de RX, en les quals tan sols hi ha un paràmetre per a potenciar les imatges relacionat amb el coeficient d'atenuació dels teixits.

La llei fonamental que regeix el fenomen de la RM es coneix amb el nom de llei de Larmor, i relaciona la freqüència de la radioona (f_r) amb el valor del camp magnètic efectiu que percep el nucli (Bef):

$$f_r = K \cdot B_{ef}$$

On K és una constant específica del protó i que depèn de la càrrega/massa.

Aquesta llei és vàlida en l'absorció de la radioona, cosa que ens permetrà seleccionar els nuclis que volem que entrin en ressonància (en el procés d'obtenció de la imatge diagnòstica es traduirà en la capacitat de seleccionar el pla tomogràfic en qualsevol direcció de l'espai). També és vàlida durant la relaxació, la qual cosa ens permetrà codificar el senyal i identificar-ne la procedència.

Per a obtenir la imatge, l'ordinador imagina dins dels pacients uns conjunts d'elements de volum (vòxels). De cada vòxel l'ordinador n'interpretarà un únic senyal que representarà en imatge després de tamisar-la per una escala de grisos o colors. Els vòxels que volem representar en la imatge es fan entrar en ressonància enviant les radioones a freqüències específiques que depenen del camp magnètic que perceben els nuclis en aquell moment, i que compleixen la llei de Larmor.

En el procés d'alliberament energètic també es compleix l'equació de Larmor, i els nuclis de H de cada vòxel, en relaxar-se, ho faran a una freqüència que depèn del camp magnètic que percep en el moment de la relaxació.

A l'antena receptora es recullen tots els senyals de tots els vòxels. Cal, doncs, per a obtenir la imatge, un procés que permeti identificar de manera individual exactament d'on ve cada senyal.

Això implica que, durant la relaxació, s'haurà de produir una codificació espacial del senyal perquè l'ordinador pugui identificar-la.

És en el procés d'obtenció de la imatge on han fet la seva aportació els dos científics guardonats amb el Nobel de Medicina del 2003: Paul Lauterbur perquè va idear el sistema que ha estat la base de la formació de les imatges actuals, i Peter Mansfield perquè va idear el sistema més ràpid d'obtenir-les, la tècnica que s'anomena EPI (Echo Planar Imaging).

Però aquest premi Nobel no és l'únic que ha recaigut sobre aquesta tecnologia. Al llarg de la història els investigadors en aquest camp han rebut diversos premis Nobel. Els principis els podríem situar reculant al començament de l'any 1920, quan Wolfgang Pauli va suposar l'existència de l'espín i el moment magnètic nuclear. L'any 1933, Otto Stern i Walther Gerlach van mesurar l'efecte de l'espín nuclear mitjançant un camp magnètic. Pels anys trenta, Isidor Isaac Rabi i C. G. Gorter van poder mesurar experimentalment el moment magnètic del protó. I Rabi va obtenir el Premi Nobel de Física l'any 1944.

La primera detecció del senyal de ressonància magnètica del protó en una mostra d'aigua va ser realitzada independentment i simultàniament a finals de l'any 1945 per l'equip d'Eduard Purcell, de la Universitat de Harvard, Massachusetts, i per Felix Bloch, de la Universitat de Stanford. Els seus articles van ser publicats al mateix número de la revista *Phys. Rev. Lett.*, de gener de 1946. Tant l'un com l'altre van rebre el Premi Nobel de Física l'any 1952.

El 1962 s'instal·là el primer espectrògraf per ressonància magnètica d'Espanya al Laboratori de Química Orgànica de la Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona. En el desenvolupament de la tecnologia RM cap a la imatge mèdica s'ha de fer esment del grup de la Universitat d'Aberdeen, a Escòcia, amb el professor John Mallard, que va començar a treballar amb la ressonància magnètica sobre ratolins, i el grup de Raymond V. Dammadian, de la Universitat de John Hopkins de Baltimore, el qual, en el número de març de 1971 de la revista *Science* (núm. 171, p. 1151), va publicar la demostració que, mitjançant mesures *in vivo*

dels paràmetres de relaxació, es podien diferenciar els teixits normals dels cancerosos.

Si bé fins aleshores la ressonància magnètica era un procediment completament analític, ja R. V. Damadian va emprendre la construcció del que seria el primer aparell de ressonància magnètica, que va patentar l'any 1972 amb el nom de «The indomitable» (fig. 3).

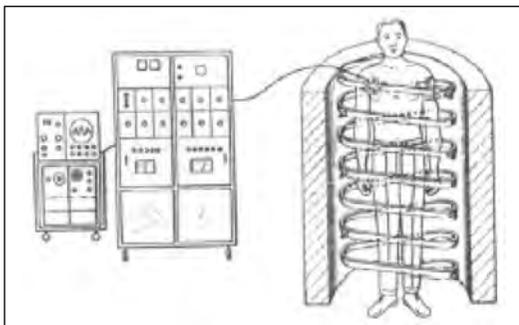


FIGURA 3. Imatge adjuntada a la patent de la primera màquina de ressonància enviada per R. V. Damadian (1972).

Però la tècnica d'obtenció de les imatges actuals es fonamenta en una idea de Paul Lauterbur, de la Universitat Stony Brook, de Nova York. Aquest científic va diferenciar el senyal de relaxació dels nuclis de H de dos tubs d'aigua aplicant un camp magnètic que variava de valor al llarg d'una direcció (és a dir, aplicant un gradient magnètic) en el moment de la relaxació. D'aquesta manera, per la dependència de la freqüència de relaxació i el camp magnètic, a cada posició li corresponia una freqüència i a l'inrevés: si analitzéssim el senyal per freqüències (anàlisi de Fourier), podríem identificar espacialment d'on prové el senyal. Cadascuna de les anàlisis freqüencials corresponia a una projecció de Fourier. A l'ordinador se li havien de donar tantes projeccions com calgués per a reconstruir la imatge, ja que el mètode de càlcul que es feia servir era el que s'aplicava a l'obtenció de les imatges de TAC de RX (retroprojecció filtrada). Les diferents projeccions s'obtenien

variant la direcció dels gradients. Les imatges de dos tubs d'aigua van ser publicades a la revista *Nature* el març de 1973 (fig. 4).

Aquest mètode va ser el sistema utilitzat en el principi de la resonància magnètica i va esperonar els diferents grups investigadors. Però el gran pas es va fer quan es va aplicar un altre mètode de càlcul utilitzant no gradients en projeccions múltiples, sinó tan sols dos gradients perpendiculars amb els quals es podia realitzar una doble codificació (per freqüència i per fase). Això va permetre una rapidesa de càlcul més elevada, ja que es podia aplicar una doble transformació de Fourier. Aquest sistema de càlcul ja l'estava utilitzant Richard Erns, el qual va rebre el Premi Nobel de Química l'any 1991.

Mentrestant, R. V. Damadian, seguint amb els seus càlculs analítics, amb la màquina «The indomitable» feia la representació del tòrax del seu ajudant M. Minkoff l'any 1972. El sistema d'obtenció era mitjançant càlcul punt a punt, i no té res a veure amb la tecnologia de gradients.

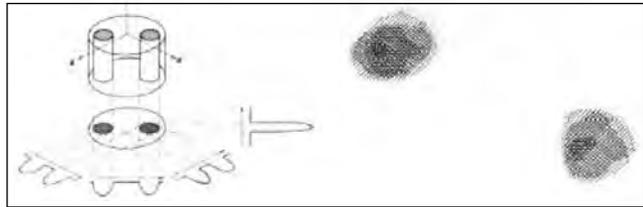


FIGURA 4. *Imatge original de P. Lauterbur publicada a la revista Nature al març de 1973. A l'esquerra, la tècnica utilitzada: quatre gradients en quatre direccions al voltant de dos tubs d'aigua. A la dreta, la imatge RM obtinguda per retroprojecció mostrant una tomografia transversal dels tubs.*

L'any 1977, Peter Mansfield va descriure una tècnica que, utilitzant gradients oscil·lants, permetia obtenir les imatges d'una manera molt ràpida. Aquesta tècnica la va anomenar EPI (Echo Planar Imaging), i quan la va descriure, els gradients eren lents i les imatges eren de baixa resolució i sobretot emborronades pel moviment quan volien aplicar-les a animals d'experimentació. Va ser una

tecnologia avançada al seu temps. Fins fa pocs anys la tècnica EPI no s'ha pogut aplicar a la clínica gràcies al desenvolupament de la tecnologia dels gradients magnètics. Actualment és una de les maneres més ràpides d'obtenir imatges (per sota dels mil·lisegons) (fig. 5).



FIGURA 5. Imatge tomogràfica obtinguda amb la tecnologia EPI de Peter Mansfield. Temps d'adquisició: 130 ms. Centre IDI-RM de l'Hospital Universitari Vall d'Hebron, de Barcelona.

L'any 1981 es va instal·lar el primer tomògraf de RM per a ús hospitalari a Europa, al Hammersmith Hospital de Londres. El 1983 la Food and Drug Administration americana (FDA) donava llum verda per a l'ús de la RM per al diagnòstic humà sota unes estrictes mesures de seguretat, i el desembre de 1983 s'obtenia a Espanya la primera imatge de RM humana al Centre de Diagnòstic Pedralbes de Barcelona.

Com a conseqüència de tot el que s'ha exposat, si la RM ha arribat a assolir aquest paper tan important en el diagnòstic clínic, ha estat sens dubte gràcies a l'esforç de molts científics al llarg de tots aquests anys. El fet que s'hagin elegit aquests dos investigadors per reconèixer aquest esforç, no ha estat lliure de polèmica. Especialment en no considerar també la contribució de R. V. Damadian. Hi ha molts científics que pensen que hauria de compartir també el Nobel.

Tothom reconeix que el camí de la RM està completament obert, i no es veu el final per als camps de la possible aplicació clínica. Entre les noves aportacions, hi ha la de sobrepassar la imatge purament morfològica per passar a donar informació fisiològica

(per exemple, en tècniques que són sensibles al moviment de difusió de l'aigua lliure), informació bioquímica (per exemple, amb imatges metabòliques obtingudes per espectrometria RM), informació funcional (com són ara els estudis cardíacs).

La carència d'efectes biològics evidenciats fins ara, fa que s'obri el camp del control directe de tècniques intervencionistes, on es podran veure en temps real les estructures que estan just davant de l'eina intervencionista. Un dels camps més apassionants (per citar-ne un) és el de les tècniques funcionals cerebrals, ja que la RM és sensible als petits canvis que s'originen quan una àrea del cervell entra en activitat per la major necessitat de sang oxigenada. Aquest canvi es pot transformar en imatge. Això permet estudiar funcionalment les diverses zones del cervell. Especialment útil és el fet que es pugui indicar a un neurocirurgià on es troba l'àrea motora quan s'ha de plantejar una intervenció al cervell. En RM es pot detectar aquesta àrea simplement fent moviments dels dits de les mans dins la màquina RM. Tot això és possible per la rapidesa amb què podem obtenir les imatges.

Per tot això, pel que ja aporta i per les possibilitats que representa la tecnologia de la ressonància magnètica al món del diagnòstic clínic, el Premi Nobel de Medicina 2003 ha volgut reconèixer l'esforç de tots els científics que hi han participat i s'han guardonat dos dels investigadors més rellevants: Paul Lauterbur i Peter Mansfield (fig. 6).

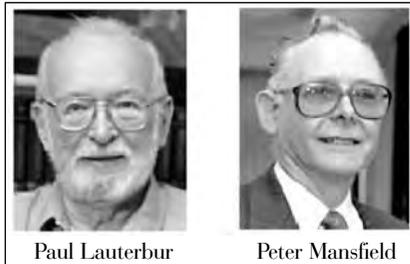


FIGURA 6. *Els científics que comparteixen el Nobel de Medicina 2003.*

