

institut

Els Premis Nobel

d'estudis

PUBLICACIONS

DE LA

PRESIDÈNCIA

5 / 2001

de l'any 2000

Cicle de conferències

catalans

**PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
5 / 2001**

This One



4FBN-3C9-N51D



Els Premis Nobel

**PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
5 / 2001**

de l'any 2000
Cicle de conferències

Disseny gràfic: Enric Satué

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

Primera edició: juny de 2001
Tiratge: 450 exemplars

Compost per fotocomposició gama, s. l.
Carrer d'Aristides Maillol, 3, 1r. 08028 Barcelona

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

ISBN: 84-7283-580-4
Dipòsit Legal: B. 25298-2001

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 drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

ÍNDIX

Introducció

7

Sobre el Premi Nobel de Medicina concedit a Arvid Carlsson,
Paul Greengard i Eric Kandel,

a càrrec de Francesc Artigas, Javier Forn i Carles Solsona

9

Sobre el Premi Nobel de Literatura concedit a Gao Xingjian,

a càrrec de Dolors Folch

39

Sobre el Premi Nobel de Química concedit a Alan J. Heeger,

Alan C. MacDiarmid i Hideki Shirakawa,

a càrrec de Concepció Rovira

55

Sobre el Premi Nobel de Física concedit a Zhores I. Alferov,

Herbert Kroemer i Jack S. Kilby,

a càrrec de Lluís Prat

85

Sobre el Premi Nobel d'Economia concedit a James J. Heckman

i Daniel L. McFadden,

a càrrec de Jaume García

117



Durant les darreres setmanes la ciència i els científics s'han vist interrogats públicament, gairebé de manera convulsiva, sobre alguns problemes de gran impacte social sobre els quals només han pogut oferir respostes parcials. La malaltia de l'encefalopatia espongiforme bovina, la possible contaminació d'alguns soldats a causa de l'urani empobrit utilitzat durant la guerra a l'antiga Iugoslàvia, o la contínua successió d'informacions referents a l'impacte de les activitats humanes sobre el clima en són bons exemples.

En aquest entorn agitat i turbulent, el dia 10 de desembre, aniversari de la mort d'Alfred Nobel, com cada any s'han lliurat al Palau de Concerts d'Estocolm els Premis Nobel de l'any a científics que han esmerçat bona part de la seva vida a la recerca i que, sovint, representen el reconeixement a unes recerques concretes però també a tota una trajectòria científica. En l'edició de l'any 2000 la majoria dels guardonats veuen reconegudes les seves aportacions i els seus descobriments ja amb una edat avançada. Especialment aquest any també s'ha posat de relleu el contrast entre la frenètica evolució de l'economia i d'algunes ciències i tecnologies i la constant i perseverant activitat dels científics en els seus centres d'investigació. Com a mostra, el Premi Nobel de Física del 2000, que ha distingit tres investigadors en unes disciplines estratègiques i fortament dinàmiques en la societat actual, les tecnologies de la informació i de la comunicació, que han contribuït de forma notable al seu desenvolupament bàsic amb treballs realitzats entre els anys 1957 i 1970.

Una de les activitats relacionades amb la recerca científica que l'Institut d'Estudis Catalans ha desenvolupat i desenvolupa amb especial interès és la difusió de la cultura i del progrés científic. Un bon nombre de les activitats públiques organitzades a la seu de l'Institut es pot classificar en aquest context. És especialment notable apreciar com, mitjançant les societats afins a les disciplines dels premis —la Societat Catalana de Biologia, la Societat Catalana de Llengua i Literatura, la Societat Catalana de Química, la Societat Catalana de Física i la Societat Catalana d'Economia—, s'ha pogut organitzar per segon any el cicle de conferències sobre els premis Nobel coincidint també en el temps amb la cerimònia de

lliurament dels premis i gaudint de conferenciants experts del nostre país que han tingut contacte personal o professional amb algun dels guardonats o amb els temes pels quals s'han atorgat els premis. Això és un bon índex del grau de desenvolupament de la nostra comunitat científica. El cicle de conferències abasta una setmana i comprèn cinc conferències. Aquesta publicació n'és el testimoni escrit i li desitjo llargs anys de continuïtat.

JOSEP ENRIC LLEBOT
Secretari científic

ELS PREMIS NOBEL

DE L'ANY 2000

SOBRE EL

PREMI NOBEL DE MEDICINA

CONCEDIT A

ARVID CARLSSON,

PAUL GREENGARD I

ERIC KANDEL,

A CÀRREC DE

FRANCESC ARTIGAS,

JAVIER FORN I

CARLES SOLSONA

ARVID CARLSSON

Arvid Carlsson va néixer el 25 de gener del 1923 a Uppsala (Suècia). L'any 1951 va obtenir la llicenciatura en Medicina a la Universitat de Lund. L'any 1959 ja era catedràtic (professor) al Departament de Farmacologia de la Universitat de Göteborg, on ha dut a terme la pràctica totalitat de la seva carrera científica. Des del 1989 és professor emèrit. Abans del Premi Nobel, Arvid Carlsson ha rebut més d'una vintena de premis i distincions diversos d'arreu del món, que honoren les seves aportacions al camp de la neurotransmissió. És autor d'uns 400 articles en revistes científiques, autor i editor de nombrosos llibres especialitzats en Neuroquímica i Neurofarmacologia i membre de nombroses societats científiques.

D'entre les diverses aportacions fetes per Arvid Carlsson al món de la Medicina, la més important, sens dubte, ha estat la identificació de la dopamina com un dels neurotransmissors més importants del cervell i el fet d'entendre el seu paper en el funcionament normal i patològic del sistema nerviós. La dopamina és una de les amines neurotransmissores del cervell, juntament amb l'acetilcolina, la serotonina i la noradrenalina. Té un paper molt important en diversos aspectes clau de la conducta humana: moviment, estat d'ànim, motivació i recompensa. Des del seu descobriment, l'any 1910, els científics creien que la dopamina era tan sols un producte intermediari en la síntesi d'un altre neurotransmissor, la noradrenalina. Aquestes idees van canviar radicalment amb el treball dut a terme per Arvid Carlsson durant les dècades dels cinquanta i seixanta. Diversos equips havien caracteritzat, mitjançant mètodes químics i histològics, l'existència de les amines neurotransmissores —catecolamines i serotonina— en el cervell dels mamífers. En particular, el treball dels neuroanatomistes de l'Institut Karolinska d'Estocolm (N. A. Hillarp i els seus deixebles A. Dahlström, K. Fuxe, T. Hökfelt i altres) avançaren en el coneixement de l'anatomia dels sistemes aminèrgics. Aquests estudis van proporcionar una base anatòmica on enquadrar les troballes farmacològiques de Carlsson, que va demostrar de forma clara que la

dopamina era un neurotransmissor per ell mateix en unes àrees discretes del cervell (especialment als ganglis basals o nuclis de la base) i no un precursor de la noradrenalina sense funció fisiològica. La utilització d'un alcaloide natural, la reserpina (extret de la *Rauwolfia serpentina*), va permetre Carlsson d'entendre els processos d'emmagatzematge, alliberament i metabolització de les catecolamines i la serotonina en els terminals sinàptics.

Gràcies a les seves investigacions, avui dia coneixem amb detall els processos metabòlics i funcionals que transcorren a les sinapsis del sistema nerviós central. L'aminoàcid L-tirosina es transforma en L-DOPA gràcies a l'existència de l'enzim tirosina hidroxilasa, present únicament en les neurones dopaminèrgiques i noradrenèrgiques del cervell. Un cop transformat en L-DOPA, es descarboxila ràpidament per acció d'un altre enzim, la descarboxilasa dels aminoàcids aromàtics, present en diversos tipus cel·lulars, i es transforma en dopamina. Aquesta s'emmagatzema en vesícules sinàptiques, per acció d'un transportador específic. Davant l'arribada d'un impuls nerviós, que despolaritza la membrana de l'axó, s'obren canals de Ca^{2+} dependents de voltatge i entren ions Ca^{2+} , necessaris per a la fusió de les vesícules sinàptiques amb la membrana del terminal nerviós, la qual cosa fa que el contingut de la vesícula es buidi a l'espai sinàptic. La dopamina actua sobre receptors específics a la membrana de la neurona postsinàptica, que formen part de complexos proteics (receptor + proteïna G + enzim o canal iònic) i indueix senyals intracel·lulars en aquesta neurona. Actualment es coneixen cinc receptors diferents dopaminèrgics, D_1 a D_5 , agrupats en dues famílies, la $D1$ (receptors D_1 i D_5) i la $D2$ (D_2 , D_3 i D_4), que es diferencien per les seves característiques farmacològiques, per les proteïnes G acoblades, i pels sistemes de transducció de senyals associats.

Al cervell dels mamífers hi ha dos sistemes dopaminèrgics diferenciats. El sistema nigroestriatal s'origina a la substància negra, àrea del mesencèfal anomenada així pel seu color fosc. La substància negra, juntament amb el nucli estriat (caudat i putàmen als primats superiors), el glòbulus pàl·lid i el nucli subtalàmic formen part dels anomenats ganglis basals o nuclis de la base, que

tenen un paper cabdal en la regulació de l'activitat motora. La substància negra es divideix en dues parts ben diferenciades: la part compacta i la part reticulada. Les neurones dopaminèrgiques de la substància negra compacta projecten al nucli estriat, on innerven profusament les neurones estriatals. La major part de les neurones estriatals són neurones GABAèrgiques de mida mitjana, amb dendrites que tenen moltes espines, i projecten cap al globus pàl·lid (via indirecta) i cap a la substància negra (via directa). Les neurones GABAèrgiques del nucli estriat integren senyals excitadors que provenen de l'escorça i el tàlem, i senyals ascendents, que provenen dels nuclis aminèrgics del mesencèfal (sobretot, dopamina i serotonina). Els cossos de les neurones dopaminèrgiques es localitzen a la part compacta de la substància negra, mentre que la via estriatonigral arriba a la part reticulada, que conté les dendrites de les neurones dopaminèrgiques i neurones GABAèrgiques que projecten al tàlem motor, entre altres àrees. Al seu torn, les neurones del tàlem motor projecten a l'escorça motora, on regulen l'activitat de les vies motores de la medulla espinal. Normalment, les neurones GABAèrgiques de la substància negra reticulada estan actives de forma espontània, la qual cosa inhibeix les neurones dels nuclis motors del tàlem i, per tant, la sortida motora de l'escorça. L'augment d'activitat de les neurones dopaminèrgiques de la substància negra compacta, a través de les seves accions a nivell del nucli estriat, atura les neurones GABAèrgiques de la substància negra reticulada, la qual cosa produeix una desinhibició del tàlem i l'escorça motora i un augment de l'activitat motriu.

La integritat d'aquest circuit còrtico-estriato-nigro-talàmic és essencial per a la regulació de l'activitat motora. Arvid Carlsson va demostrar que els ganglis basals —en especial estriat i substància negra— contenen concentracions molt altes de dopamina i que aquesta és necessària per al bon funcionament d'aquest circuit. En efecte, el tractament de rosegadors amb reserpina (que redueix dràsticament el contingut cerebral de les amines neurotransmissores) produïa fortes alteracions de la deambulació, que s'assemblaven als símptomes dels malalts de Parkinson. El tractament amb L-DOPA, aminoàcid precursor de la dopamina, revertia els efectes

de la reserpina i normalitzava el contingut cerebral de dopamina. Així, doncs, semblava existir una relació directa entre manca de dopamina i simptomatologia de la malaltia de Parkinson. Aquesta observació, reforçada amb la constatació que la dopamina era veritablement un neurotransmissor al cervell dels mamífers, va dur O. Hornykiewicz, un neuròleg de Viena, a proposar que el mal de Parkinson era degut a un dèficit funcional de la neurotransmissió dopaminèrgica i a emprar la L-DOPA com a tractament per a la malaltia de Parkinson. Avui dia sabem que aquesta malaltia és deguda a una degeneració de les neurones dopaminèrgiques de la substància negra compacta. Per raons encara desconegudes, aquestes neurones sofreixen un procés de mort cel·lular, cosa que produeix una reducció dràstica de la quantitat de dopamina al nucli estriat. La manca de dopamina produeix la simptomatologia típica d'aquesta malaltia: tremolors, rigidesa muscular i lentitud de moviments. Gràcies a diverses innovacions tecnològiques, com ara les tècniques de neuroimatge (per exemple, la tomografia per emissió de positrons; *PET scanning*), avui dia es pot observar el dèficit de dopamina al nucli estriat de malalts de Parkinson i els efectes del tractament. Malgrat que el tractament de la malaltia amb L-DOPA no és l'ideal (presenta tolerància al cap d'un temps i es produeixen acinèsies sobtades), és ara per ara, més de trenta anys després del seu descobriment, el tractament d'elecció per a aquesta malaltia neurodegenerativa.

L'altre gran sistema dopaminèrgic existent al cervell és el que s'origina en una altra àrea del mesencèfal, l'àrea tegmental ventral. A diferència de les neurones de la substància negra, aquestes altres projecten cap a regions de l'escorça i del sistema límbic implicades en funcions superiors, com l'atenció, la cognició, la memòria i la regulació dels estats d'ànim. Aquest sistema se subdivideix en dos (mesolímbic i mesocortical), segons les àrees innervades (tubercle olfatori, nucli *accumbens*, amígdala per al mesolímbic i escorça prefrontal per al mesocortical), però a efectes funcionals se solen tractar com un de sol, ateses les relacions existents entre ambdós. Des d'un punt de vista neuroquímic i farmacològic, els sistemes originats a la substància negra i a l'àrea teg-

mental ventral no presenten grans diferències, tan sols en la distribució dels subtipus de receptors de dopamina en cadascuna d'aquestes àrees.

Si el sistema dopaminèrgic originat a la substància negra és important per a una malaltia neurològica —la malaltia de Parkinson—, el de l'àrea tegmental ventral és cabdal per al control de la conducta humana, tant normal com patològica. En efecte, substàncies emprades com a drogues d'abús, com l'amfetamina i els seus derivats més moderns (MDMA o èxtasi), són potents alliberadors de la dopamina. En aquest camp, les conseqüències dels estudis d'Arvid Carlsson han estat tant o més importants que en el camp dels trastorns del moviment. La identificació de la dopamina com a neurotransmissor va iniciar el desenvolupament d'agonistes i antagonistes de les seves accions. La identificació de la clorpromazina i l'haloperidol com a antagonistes no selectius dels receptors dopaminèrgics va obrir unes perspectives insospitades en el tractament de l'esquizofrènia. Aquestes i altres substàncies són emprades encara avui en el tractament de la simptomatologia de l'esquizofrènia i altres trastorns psicòtics. El seu efecte clínic és una reducció de la simptomatologia positiva (al·lucinacions auditives o visuals, pensaments i comportaments aberrants, etc.) amb poc efecte, però, sobre la simptomatologia negativa (manca d'interès, poca relació social, pèrdua de l'afectivitat, etc.). A més, el bloqueig mantingut dels receptors dopaminèrgics produeix importants efectes secundaris (discinècies tardanes) que sovint obliguen a retirar el tractament. Aquests problemes han fet sorgir una nova generació de fàrmacs antipsicòtics, anomenats «atípics», amb accions preferentment antiserotoninèrgiques. Durant els darrers anys, i malgrat la seva situació de professor emèrit, Arvid Carlsson està treballant activament en la superació d'aquests problemes, desenvolupant nous fàrmacs i estudiant possibles noves dianes terapèutiques (per exemple, els receptors D₃). En particular, durant la darrera dècada, Carlsson i el seu equip han estat estudiant les interaccions del glutamat (principal neurotransmissor excitador del cervell) i la dopamina a fi de dissenyar noves estratègies de tractament que minimitzin els efectes nocius del tractament amb els fàrmacs antipsicò-

tics clàssics. Ateses les relacions existents entre dopamina i glutamat als circuits dels ganglis basals esmentats anteriorment, aquests estudis també tenen implicacions en la teràpia de la malaltia de Parkinson. Així, Carlsson i els seus col·laboradors han observat que l'MK-801, antagonista dels receptors glutamatèrgics NMDA, reverteix la reducció de l'activitat motriu induïda per substàncies que buiden les neurones de dopamina. Una altra observació important és que la fenciclidina (*angel... angel dust*), emprada com a droga d'abús, produeix quadres esquizofrènics, igual que l'abús continuat d'amfetamina. La fenciclidina és un antagonista no competitiu del receptor NMDA, mentre que l'amfetamina allibera dopamina. Així, doncs, existeix una relació funcional entre ambdós sistemes que ha possibilitat el disseny de noves molècules amb acció sobre els receptors de glutamat que són actives en models animals de Parkinson (per exemple, degeneració induïda per 6-OHDA o MPTP) i d'esquizofrènia.

Hi ha una dita en Medicina que afirma que les dues maneres més comunes de ser famosos són donar nom a una malaltia (per exemple Alois Alzheimer) o identificar una substància amb funcions fisiològiques o patològiques. Sens dubte, Arvid Carlsson no ha donat nom a cap malaltia, però passarà a la posteritat pel seu descobriment de la dopamina com a neurotransmissor fonamental per al bon funcionament del cervell humà i per les possibilitats que aquest fet ha obert en el tractament de malalties tan devastadores com el Parkinson o l'esquizofrènia.

APROXIMACIÓ INTERDISCIPLINÀRIA DE PAUL GREENGARD A L'ESTUDI DE LA COMUNICACIÓ NEURONAL

1. BREU CURRÍCULUM DE PAUL GREENGARD

Paul Greengard va néixer a Nova York l'11 de desembre de 1925. Després d'estudiar al Hamilton College, va obtenir un doctorat en Neurofisiologia al departament de Biofísica de la Universitat Johns Hopkins el 1953. Després d'uns quants anys de permanència a l'Institut de Psiquiatria i a l'Institut Nacional per a la Recerca Mèdica de Londres, on treballà en enzimologia i metabolisme del sistema nerviós, va tornar als Estats Units. Entre 1958 i 1959 va estar al Laboratori de Bioquímica Clínica dels Instituts Nacionals de la Salut a Bethesda, Maryland, i entre 1959 i 1967 va treballar en la indústria farmacèutica com a director del departament de Bioquímica dels laboratoris de recerca Geigy. El 1968 va ser nomenat professor del Departament de Farmacologia de la Facultat de Medicina de la Universitat de Yale. El 1983 va ser nomenat *Vincent Astor Professor* de la Universitat Rockefeller, on dirigeix fins avui el Laboratori de Neurociència Molecular i Cel·lular. L'any 2000 li ha estat concedit el Premi Nobel de Fisiologia i Medicina juntament amb Arvid Carlsson i Eric Kandel pels seus treballs sobre comunicació neuronal.

Hi ha dos períodes ben diferenciats en la seva producció científica: abans de 1968 i després de 1968. En la seva època postdoctoral va publicar alguns treballs sobre neurofisiologia, neuroquímica i metabolisme intermediari del teixit nerviós. Destaquen alguns articles en col·laboració amb J. M. Ritchie en què van estudiar el mecanisme d'acció dels anestèsics locals i van establir que era la forma catiònica de l'anestèsic la que inhibia el transport de sodi. Durant l'època en què va ser director de Geigy va publicar diversos treballs sobre el metabolisme hepàtic i la síntesi d'aldosterona *in vitro*. Va ser a partir de 1968, l'any en què va arribar a Yale com a professor, quan va concentrar tots els seus esforços en els estudis dels mecanismes de comunicació neuronal i va iniciar una intensa i productiva activitat científica

que ha estat premiada l'any 2000 amb la concessió del Premi Nobel.

2. ANTECEDENTS CIENTÍFICS I OBJECTIUS DE LES SEVES RECERQUES

La línia de recerca iniciada el 1968 per Greengard sobre els mecanismes de comunicació neuronal es va basar fonamentalment en coneixements previs sobre la transmissió dopaminèrgica en el sistema nerviós central i sobre la funció de l'AMP cíclic i de la fosforilació de proteïnes en la transmissió de senyals.

El descobriment realitzat pel grup de Brodie el 1955 del fet que la reserpina produeix la desaparició total dels dipòsits neuronals de serotonina (Pletscher *et al.*, 1955) va marcar l'inici de la psicofarmacologia moderna. Feia pocs anys que la reserpina, un alcaloide d'origen natural, havia estat introduït en la terapèutica, i havia despertat un enorme interès entre els farmacòlegs i els psiquiatres per les seves propietats tranquil·litzants i antipsicòtiques. També s'havia observat que els pacients sotmesos a tractaments prolongats presentaven sovint trastorns motors de tipus extrapiramidal similars als que caracteritzen la malaltia de Parkinson. El dramàtic efecte de la reserpina sobre els nivells de serotonina, un neurotransmissor cerebral, feia pensar que els efectes depressors centrals de la reserpina eren conseqüència d'aquest efecte bioquímic. Però l'any següent es va descobrir que la reserpina també buidava els dipòsits cerebrals de noradrenalina i dopamina (Holzhaner i Vogt, 1958). Aquestes troballes van marcar l'inici d'una prolongada disputa científica entre els grups de Brodie i els de Carlsson sobre si la responsable dels efectes depressius de la reserpina era la depleció de serotonina o la de catecolamines. És curiós que, gairebé cinquanta anys després d'aquestes descobertes, la controvèrsia encara no estigui resolta. Durant molts anys els fàrmacs utilitzats com a antidepressius han actuat sobre la transmissió noradrenèrgica, però en el darrer decenni els nous fàrmacs antidepressius actuen sobre mecanismes serotoninèrgics, i el substrat

bioquímic de la depressió endògena continua essent una incògnita. Tanmateix, coneixem molt bé el mecanisme dels efectes motors de tipus parkinsonià que produeix la reserpina. Aquests coneixements són deguts en bona part a les recerques de Carlsson, que va demostrar (1957) que l'administració de DOPA, un precursor de les catecolamines, però no la de 5-hidroxitriptòfan, un precursor de la serotonina, antagonitza els efectes motors produïts per l'administració de reserpina. El descobriment del fet que la dopamina es trobava al cervell, localitzada als ganglis basals (Carlsson, 1959) tant en els animals com en els humans, va fer ressaltar la importància clínica d'aquestes descobertes. La troballa fonamental de Hornykiewicz i dels seus col·laboradors de la desaparició gairebé total de dopamina als ganglis basals en els malalts parkinsonians, a causa de la degeneració de la projecció dopaminèrgica des de la substància negra, va donar suport a la hipòtesi de Carlsson d'utilitzar DOPA en el tractament de la malaltia de Parkinson. Els primers assaigs clínics van tenir un èxit rotund i van determinar la introducció de la levodopa en la terapèutica.

El segon pilar de les recerques de Greengard fou el descobriment del paper de l'AMP cíclic com a segon missatger. Estudiant el mecanisme d'acció glicogenolítica de l'adrenalina en cèl·lules hepàtiques, Sutherland i Rall van realitzar el 1957 el transcendent descobriment del fet que quan les membranes de les cèl·lules hepàtiques eren exposades a l'adrenalina es formava un factor termostable que, en ser afegit al citoplasma de les cèl·lules hepàtiques, era capaç de reproduir l'efecte de l'adrenalina i produir la conversió de glicogen en glucosa. Aquest factor es va identificar com el 3,5'-monofosfat d'adenosina o AMP cíclic, un nucleòtid químicament relacionat amb l'ATP. Es va identificar un enzim unit a la membrana, l'adenilat ciclasa, que, en ser activat, converteix l'ATP en AMP cíclic, el qual al seu torn té una vida mitjana curta i és degradat per una fosfodiesterasa a 5'-AMP.

Durant molts anys es va desconèixer el mecanisme per mitjà del qual l'AMP cíclic activa la glicogenòlisi. El 1968 Krebs i els seus col·laboradors van descobrir (Walsh *et al.*, 1968) una proteïna-cinasa que s'activava per concentracions baixes d'AMP cíclic.

La proteïna-cinasa dependent de l'AMP cíclic conté dues subunitats reguladores i dues subunitats catalítiques. Quan l'AMP cíclic s'uneix a l'enzim té lloc un canvi de conformació i s'alliberen les dues subunitats catalítiques amb activitat enzimàtica. Aquestes unitats catalítiques poden fosforilar grups hidroxil de residus de treonina i serina, i d'aquesta manera activen diversos enzims.

Després del descobriment de Krebs, Greengard i els seus col·laboradors van demostrar que la proteïna-cinasa dependent de l'AMP cíclic es troba àmpliament distribuïda en tots els teixits d'espècies animals distintes i allhora en van detectar una elevada concentració al cervell (Miyamoto *et al.*, 1968; Kno i Greengard, 1969). Aquest fet va portar Greengard a emetre la hipòtesi que la unitat reguladora de la proteïna-cinasa és l'únic receptor de l'AMP cíclic i que tots els efectes de l'AMP cíclic es produeixen per l'activació de proteïnes-cinases. D'altra banda, van trobar que la proteïna-cinasa estava concentrada a les fraccions sinàptiques del cervell. Això els va induir a proposar que al cervell l'AMP cíclic no solament podria tenir accions metabòliques similars a les descobertes en altres òrgans, sinó també altres processos moleculars lligats a funcions neuronals específiques, com ara la transmissió sinàptica o el creixement neuronal. Greengard va iniciar un seguit de recerques sistemàtiques per identificar, caracteritzar i purificar les cinases cerebrals dependents de l'AMP cíclic, les fosfatases que alliberen els fosfats incorporats, així com enzims que regulen els nivells d'AMP cíclic, l'adenilat ciclasa i la fosfodiesterasa. En les seves investigacions va dedicar una atenció especial a la recerca i caracterització de proteïnes neuronals regulades per mecanismes de fosforilació. Un enfocament repetidament emprat ha estat la identificació de proteïnes que es fosforilen per estímuls específics, i a continuació caracteritzar aquestes proteïnes amb relació a les seves propietats bioquímiques, anatòmiques i fisiològiques.

Per a la seva recerca, Greengard ha usat un enfocament interdisciplinari, combinant sovint tècniques electrofisiològiques amb tècniques de bioquímica i de biologia molecular.

La importància dels processos de fosforilació en mecanis-

mes neuronals es va confirmar en un seguit d'experiments en animals amb un sistema nerviós simple que permet l'estudi cel·lular dels reflexos neuronals. Un d'aquests models és el cargol marí *Aplysia*, amb el qual Eric Kandel ha realitzat una gran part de les seves recerques amb què ha demostrat que els fenòmens de sensibilització i habituació davant un estímul tenen com a substrat variacions en l'alliberament del neurotransmissor. Doncs bé, en col·laboració amb Greengard, Kandel va poder demostrar que la injecció intraneuronal de la subunitat catalítica de la proteïna-cinasa AMP cíclic dependent regula diferents tipus de canals de K⁺ i modifica l'alliberament del neurotransmissor, efecte que s'ha relacionat amb la memòria a curt i a llarg termini (Castellucci *et al.*, 1980).

3. LA MEVA TROBADA AMB GREENGARD I ELS ANYS DE COL·LABORACIÓ

20

L'octubre de 1968, amb una beca postdoctoral, vaig anar a treballar durant dos anys al Laboratori de Farmacologia Química dels Instituts Nacionals de la Salut, dirigit pel famós farmacòleg Bernard B. Brodie. Tot i que jo no ho sabia, serien, per motius de salut, els dos últims anys de Brodie com a director d'aquell laboratori. Això pot explicar el fet que, encara que al començament vaig seguir una de les línies de recerca clàssica al laboratori, la regulació del metabolisme de la serotonina, de seguida m'orientés cap a un nou camp que s'estava obrint, el dels nucleòtids cíclics com a segons missatgers i les seves possibles funcions en el sistema nerviós. Això em va ser possible perquè aleshores treballava al laboratori de Brodie un bioquímic excel·lent, Gopal Krishna, que acabava de publicar un mètode original, el qual va tenir una gran ressonància, per determinar la formació d'AMP cíclic a partir d'adenina tritíada. Aquest mètode, senzill i ràpid, permetia de valorar l'activitat de l'adenilat ciclase i la formació d'AMP cíclic. En col·laboració amb Krishna, aviat vam poder demostrar que, en talls d'àrees cerebrals distintes incubades *in vitro*, la noradrenalina i la histamina pro-

duïen notables augments de la formació d'AMP cíclic. Hi vam trobar diferències importants segons les àrees i les espècies estudiades. El descobriment que en el conill i en el cobai la histamina és l'agent més potent va ser particularment interessant. En canvi, en la rata, el ratolí, el gat i el mico la noradrenalina era molt més potent que la histamina. També vam fer un estudi sobre la distribució regional d'AMP cíclic al cervell de rata. Posteriorment, i ja a l'Estat espanyol, vaig demostrar (Forn i Valdecasas, 1971) que el liti, un agent molt utilitzat en el tractament de la psicosi maniaco-depressiva, a concentracions terapèutiques inhibia la forma d'AMP cíclic induït per noradrenalina en talls de cervell de rata. Alguns d'aquests resultats, els vaig presentar en un congrés de farmacologia a Milà i van atreure l'atenció de Greengard. La conversa que vam mantenir a Milà va donar origen a una correspondència i finalment a una oferta de Greengard perquè anés a treballar al seu laboratori al departament de Farmacologia de la Facultat de Medicina de la Universitat Yale. Vaig acceptar la seva invitació i a la darrera de l'any 1973 em vaig traslladar a Yale, on vaig estar com a associat de recerca durant una mica més de quatre anys.

La meva col·laboració amb Greengard va quedar reflectida en deu articles publicats i va ser particularment fructífera en dues àrees a les quals el seu laboratori va dedicar un interès especial: la regulació de l'adenilat ciclase per la dopamina i la funció i la regulació de fosfoproteïnes neuronals específiques.

4. RECERQUES SOBRE ENZIMS QUE REGULEN EL METABOLISME DE L'AMP CÍCLIC

Malgrat que s'havia demostrat que diversos neurotransmissors eren capaços d'augmentar la formació d'AMP cíclic en talls d'àrees cerebrals distintes incubades *in vitro*, no s'havia aconseguit actuar amb neurotransmissors l'adenilat ciclase en homogeneïtzats de teixit cerebral, i tampoc no s'havia pogut demostrar que la dopamina fos capaç d'incrementar la formació d'AMP cíclic. No obstant això, com hem comentat abans, ja s'havia demostrat que la levo-

dopa, un precursor de la dopamina, era eficaç en el tractament de la malaltia de Parkinson. Per demostrar que l'efecte de la dopamina estava lligat funcionalment a la síntesi d'AMP cíclic, calia identificar un adenilat ciclase capaç de sintetitzar AMPc en presència de dopamina. El 1972 Kebabian i Greengard van ser capaços de demostrar l'existència d'un adenilat ciclase en homogeneïtzadors de nucli caudat sensible a la dopamina i que tenia unes característiques molt similars a la de l'hipotètic receptor dopaminèrgic (Kebabian *et al.*, 1972). El mesurament de l'activitat agonista dopaminèrgica, que requeria proves *in vivo* enutjoses, es va fer més precís i senzill mesurant l'activitat de l'adenilat ciclase.

Fins aleshores tampoc no s'havia pogut demostrar que la dopamina aplicada a preparats amb neurones intactes augmentés la concentració d'AMP cíclic. Nosaltres, per mitjà de l'ús de talls de nucli caudat incubats *in vitro*, vam poder demostrar un efecte específic de la dopamina, que es blocava per un antagonista de receptors de dopamina, la flufenazina, i que no es modificava per la presència d'un blocador beta-adenèrgic (Forn *et al.*, 1972). En experiments posteriors vam poder demostrar que les lesions a les vies nigrostriades produeixen un augment de la formació d'AMP cíclic induït per dopamina (DA) en talls de nucli caudat del costat lesionat. Aquests resultats permetien d'explicar el moviment circular contralateral induït per agonistes dopaminèrgics en rates amb lesions unilaterals de les vies nigrostriades (Krueger *et al.*, 1976).

5. RECERQUES SOBRE LES CARACTERÍSTIQUES I LES FUNCIONS DE LES FOSFOPROTEÏNES NEURONALS

Greengard va emprendre des de 1968 una recerca sistemàtica per evidenciar relacions entre la fosforilació de proteïnes i la funció neuronal. Tots els sistemes de fosforilació proteica tenen un mínim de tres components. En primer lloc, les fosfoproteïnes mateixes, que actuen com a substrats: les seves propietats biològiques canvien depenent del fet que es trobin en estat de fosforilació o de desfosforilació. En segon lloc, un conjunt d'enzims, les proteïnes-cina-

ses, fosfotransferases que catalitzen la transferència de fosfat, i finalment, les proteïnes-fosfatases, que desfosforilen les fosfoproteïnes i tornen el sistema al seu estat basal.

Els estudis de Greengard i d'altres han evidenciat que els enzims que regulen la formació d'AMP cíclic i la fosforilació i desfosforilació de proteïnes en el sistema nerviós i els enzims similars existents en altres teixits i òrgans no es diferencien gaire en les seves propietats fonamentals. Aviat es va fer palès que aquells processos específicament neuronals que siguin regulats per mecanismes de fosforilació només seran ben coneguts si coneixem les propietats estructurals, bioquímiques i fisiològiques de les fosfoproteïnes neuronals les funcions de les quals depenen del seu estat de fosforilació/desfosforilació. Per això Greengard va dedicar una atenció particular a la identificació i l'estudi de fosfoproteïnes que es trobessin únicament en teixits nerviosos i que, per tant, podien estar involucrades en funcions exclusives del sistema neuronal. En el curs d'aquestes recerques Greengard ha identificat nombroses proteïnes que semblen trobar-se només en el sistema nerviós i que podrien estar relacionades amb determinades funcions fisiològiques. Entre aquestes fosfoproteïnes podríem destacar la sinapsina I i la DARP-32. Aquestes fosfoproteïnes han estat ben caracteritzades, purificades, aïllades i hom ha identificat alguna de les seves funcions fisiològiques. Són l'exemple més bo de les enormes possibilitats de l'enfocament usat per Greengard, i les descriurem amb un cert detallisme.

23

a) SINAPSINA I

La sinapsina I, que en els primers estudis va rebre el nom de proteïna I, es va identificar per primera vegada el 1972 com un substrat endogen de la proteïna-cinasa dependent de l'AMP cíclic en fraccions sinàptiques d'homogeneïtzats de cervell (Johnson *et al.*, 1972). Posteriorment vam poder demostrar (Sieghart, 1979) que també era un bon substrat per a proteïnes-cinases dependents del calci. La sinapsina I va ser purificada i caracteritzada, i se n'ha aïllat l'RNA missatger corresponent. De seguida es

va demostrar que la sinapsina I tan sols es troba en el sistema nerviós.

Es van portar a terme molts intents per estudiar la regulació de l'estat de fosforilació de la sinapsina I en preparacions de teixit nerviós intacte. Probablement aquests primers intents van fracassar perquè durant l'homogeneïtzació del teixit les proteïnes-fosfatases no es desactivaven. Finalment vam desenvolupar un mètode (Forn i Greengard, 1978) en què l'extracció amb acetat de zinc inhibia les proteïnes-fosfatases endògenes i es conservava l'estat de fosforilació aconseguit a les neurones intactes. Així vam poder demostrar que l'entrada de calci produïda per cicles successius de despolarització i polarització per concentracions elevades de K^+ produeix nombroses transformacions de desfosfoproteïna I en fosfoproteïna I. Aquesta fosforilació es produeix per l'activació d'una proteïna-cinasa dependent de calci/calmodulina. L'augment dels nivells d'AMP cíclic també produeix fosforilació de sinapsina I, per l'activació d'una proteïna-cinasa dependent de l'AMP cíclic. Posteriorment es va demostrar que les fosforilacions dependents del calci i de l'AMP cíclic es produeixen en diferents llocs de la proteïna.

Determinats estudis citoquímics han evidenciat que la sinapsina I es troba en totes les terminacions nervioses, associada amb les vesícules sinàptiques. Estudis bioquímics i observacions de microscòpia electrònica han demostrat que la sinapsina I es troba fixada a la part externa de les membranes de les vesícules sinàptiques. La fosforilació de sinapsina I disminueix la seva afinitat per les vesícules sinàptiques. Posteriorment es va demostrar que breus períodes de conducció nerviosa produeixen un augment de l'estat de fosforilació de sinapsina I al gangli cervical superior.

L'estimulació de receptors presinàptics per diversos neurotransmissors també estimula la fosforilació de sinapsina I. Factors com ara la localització neuronal de sinapsina, la seva associació amb les vesícules sinàptiques i la seva major o menor afinitat per les vesícules segons el seu estat de fosforilació indueixen a pensar que està íntimament lligada a la funció d'alliberament del neuro-

transmissor. Uns experiments de Greengard en col·laboració amb Llinás van aportar una demostració més directa d'aquesta hipòtesi (Llinás, 1985). En la sinapsi gegant del calamar es va demostrar que la injecció de desfosfosinapsina I disminueix l'alliberament del neurotransmissor. El model proposat per Greengard és que la fosforilació de sinapsina I dependent del calci regula l'alliberament del neurotransmissor induït per l'estimulació i despolarització neuronal, mentre que la fosforilació dependent de l'AMP cíclic seria el mecanisme pel qual diversos neurotransmissors, actuant sobre receptors presinàptics, disminueixen l'alliberament del neurotransmissor, modulant així la transmissió nerviosa.

En experiments *in vitro* s'ha demostrat que la sinapsina I desfosforilada interactua amb diversos components del citoesquelet neuronal, i especialment amb la F-actina. Això suggereix que la sinapsina uneix reversiblement les vesícules sinàptiques al citoesquelet, i que d'aquesta manera regula la disponibilitat de vesícules sinàptiques per al procés d'exocitosi (Valtorta *et al.*, 1992).

Fins ara hem parlat del paper regulador de la sinapsina I en l'alliberament del neurotransmissor, però també existeixen diverses observacions que suggereixen que la sinapsina I té un paper important en el desenvolupament de les sinapsis i en la formació d'axons i de dendrites. En línies cel·lulars híbrides de neuroblastoma i glioma, la sobreexpressió de sinapsina produeix un augment de la formació de varicositats i sinapsis. Així mateix, la microinjecció de sinapsina I en embrions de *Xenopus* produeix un desenvolupament més gran de les sinapsis neuromusculars. En una altra sèrie d'experiments es van aconseguir, per mitjà de tècniques recombinants, ratolins deficients en sinapsina I. En neurones de l'hipocamp d'aquests ratolins s'ha demostrat un retard important en el creixement de dendrites i d'axons i una disminució de la sinapsi (Chin *et al.*, 1995). Encara no sabem si la sinapsina regula aquests processos per mitjà de mecanismes similars als descoberts per a l'alliberament de neurotransmissors, però sens dubte s'obren noves perspectives quant al paper de les fosfoproteïnes en el sistema nerviós.

b) DARP-32

L'any 1983 Greengard i els seus col·laboradors van descriure una fosfoproteïna (Walaas *et al.*, 1983) que es troba en àrees cerebrals riques en receptors dopaminèrgics del tipus D1 (neostriat), precisament els receptors acoblats a un adenilat ciclasa, la fosforilació del qual és regulada per l'AMP cíclic i per la dopamina. Per les seves característiques i pes molecular li van donar el nom de DARP-32 (*Dopamine and cyclic AMP Regulated Protein*). En un teixit intacte l'efecte de la dopamina era blocat per la flufenazina, un antagonista específic de receptors dopaminèrgics, mentre que altres neurotransmissors, com ara l'NA o serotonina, eren inactius. La DARP-32 va ser purificada i es va observar que en la seva forma fosforilada és un potent inhibidor de la proteïna-fosfatasa-1. La calcineurina (proteïna-fosfatasa-2B), un enzim activat per Ca^{++} /calmodulina, desfosforila la DARP-32. És un possible mecanisme pel qual el Ca^{2+} podria atenuar el senyal dopaminèrgic a través de l'augment d'AMP cíclic. Estudis electrofisiològics han demostrat que la dopamina és capaç d'inhibir l'activitat produïda per l'aplicació de glutamat en neurones del nucli caudat. El caudat rep importants projeccions glutaminèrgiques del neocòrtex. Greengard i els seus col·laboradors han pogut demostrar que l'activitat de receptors glutamínic del tipus NMDA inhibeix la fosforilació de la DARP-32 dependent de l'AMP cíclic. Aquest efecte es produeix probablement perquè el glutamat, mitjançant un augment del calci, produeix una activació de calcineurina.

Recentment s'ha pogut evidenciar un efecte de la fosfo-DARP-32 en neurones estriades de rata mantingudes en un cultiu. Mitjançant estudis de *patch clamp* s'ha observat que la injecció de fosfo-DARP-32 redueix l'amplitud del corrent de sodi. Sembla que la DARP-32 fosforilada redueix el corrent de sodi estabilitzant un estat fosforilat del canal de sodi. Uns estudis més recents indiquen que la cascada DARP-32/PP-1 regula l'estat de fosforilació i l'activitat de molts efectes fisiològics de neurones dopaminèrgiques i ofereix noves possibilitats per descriure l'etiologia de malalties relacionades amb alteracions de la neurotransmissió dopaminèrgica.

com ara la malaltia de Parkinson, l'esquizofrènia o l'addicció a les drogues, i ofereix noves dianes per al desenvolupament de fàrmacs per al tractament d'aquestes malalties (Greengard *et al.*, 1999).

6. CONSIDERACIONS FINALS

Els treballs de Greengard i dels seus col·laboradors han demostrat que la fosforilació de proteïnes és un mecanisme regulador que té una importància particular en les funcions pròpies del sistema nerviós. D'altra banda, ha obert una estratègia experimental que es pot utilitzar per descobrir i analitzar les bases moleculars de fenòmens neuronals tan importants com la transmissió sinàptica, el reconeixement entre neurones, el desenvolupament neuronal, la plasticitat neuronal i la memòria. Les seves recerques han conduït a importants descobertes a nivell molecular, com ara el paper de les sinapsines en l'alliberament del neurotransmissor i en la plasticitat sinàptica, o d'una proteïna, la DARP-32, que regula les accions postsinàptiques de la dopamina i d'altres neurotransmissors. Però potser el futur ens dirà que la seva aportació més gran ha estat el fet d'ensenyar-nos un camí per descobrir els mecanismes moleculars de nombrosos processos cerebrals i obrir nous camps terapèutics.

BIBLIOGRAFIA

- CARLSSON, A.; LINDQUIST, M.; MAGNUSSON, T. (1957). «3,4-Dihydroxyphenylamine and 5-hidroxytryptophan as reserpine antagonists». *Nature*, núm. 180, p. 1200.
- CARLSSON, A. (1959). «The occurrence, distribution and physiological role of catecholamines in the nervous system». *Pharmacol Rev.*, núm. 11, p. 490-493.
- CASTELLUCCI, V. F.; KANDEL, E. R.; SCHWARTZ, J. H.; WILSON, F. D.; NAVIN, A. C.; GREENGARD, P. (1980). «Intracellular injection of the catalytic subunit of cyclic-AMP dependent protein kinase simulates facilitation of transmitter release underlying behavioral sensitization in Aplysia». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 77 (12), p. 7492-7496.
- CHIN, L. S.; LI, L.; FERREIRA, A.; KOSIK, K. S.; GREENGARD, P. (1995). «Impairment of axonal development and of synaptogenesis in hippocampal neurons of synapsin I-deficient mice». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 92 (20), p. 9230-9234.
- FORN, J.; VALDECASAS, F. G. (1971). «Effects of lithium on brain adenylyl cyclase activity». *Biochem Pharmacol*, núm. 20, p. 2773-2779.
- FORN, J.; KRUEGER, B. K.; GREENGARD, P. (1974). «Adenosine 3',5'-monophosphate content in rat caudate nucleus: demonstration of dopaminergic and adrenergic receptors». *Science*, núm. 186 (4169), p. 1118-1120.
- FORN, J.; GREENGARD, P. (1978). «Depolarizing agents and cyclic nucleotides regulate the phosphorylation of specific neuronal proteins in rat cerebral cortex slices». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 75 (10), p. 5195-5199.
- GREENGARD, P. (1976). «Possible role for cyclic nucleotides and phosphorylated membrane proteins in postsynaptic actions of neurotransmitters». *Nature*, núm. 260 (5547), p. 101-108.
- (1978). «Phosphorylated proteins as physiological effects». *Science*, núm. 199 (4325), p. 146-152.

- GREENGARD, P.; ALLEN, P. B.; NOURN, C. (1999). «Beyond the dopamine receptor: the DARP-32/protein phosphatase-1 cascade». *Neuron*, núm. 23 (3), p. 435-447.
- HOLZBAUER, M.; VOGT, M. (1956). «Depression by reserpine of the noradrenaline concentration in the hypothalamus of the cat». *J. Neurochem*, núm. 1, p. 8-11.
- KEBABIAN, J. W.; PETZOLD, G.; GREENGARD, P. (1972). «Dopamine-sensitive adenylate cyclase in the caudate nucleus of the rat brain and its similarity to the «dopamine receptor»». *Proc. Nat. Acad. Sci.*, núm. 69, p. 2145-2149.
- KRUEGER, B. K.; FORN, J.; WATERS, J. R.; ROTH, R. H.; GREENGARD, P. (1976). «Stimulation by dopamine of adenosine 3',5' monophosphate formation in rat caudate nucleus: effect of lesions of the nigro-neostriate pathway». *Mol Pharmacol*, núm. 12 (4), p. 639-648.
- KUO, J. F.; GREENGARD, P. (1969). «Cyclic nucleotide-dependent protein kinases. IV Widespread occurrence of adenosine 3',5'-monophosphate-dependent protein kinase in various tissues and phyla of the animal kingdom». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 64, p. 1349-1355.
- LLINÁS, R.; MC GUINNESS, T. L.; LEONARD, C. S.; SUGIMORI, M.; GREENGARD, P. (1985). «Intraterminal injection of Synaptin I or calcium/calmodulin dependent protein kinase II alters neurotransmitter release at the squid giant axon». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 82, p. 3035-3039.
- MİYAMOTO, E.; KUO, J. F.; GREENGARD, P. (1968). «Adenosine 3',5'-monophosphate-dependent protein kinase from brain». *Science*, núm. 165 (888), p. 63-65.
- PLETSCHER, A.; SHORE P. A.; BRODIE, B. B. (1955). «Serotonin release as a possible mechanism of reserpine action». *Science*, núm. 122, p. 374-375.
- SIEGHART, W.; FORN, J.; GREENGARD, P. (1979). «Ca²⁺ and cyclic AMP regulate phosphorylation of same two membrane associated proteins specific to nervous tissue». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, núm. 76, p. 2475-2479.
- VALTORTA, F.; BENFENATI, F.; GREENGARD, P. (1992). «Structure and

- function of the synapsins». *J. Biol. Chem.*, núm. 267 (11), p. 7195-7198.
- WILKINS, S. I.; ASWAD, D. W.; GREENGARD, P. (1983). «A dopamine and cyclic AMP-regulated phosphoprotein enriched in dopamine-innervated brain regions». *Nature*, núm. 301, p. 69-71.
- WISHLI, D. A.; PERKINS, J. P.; KREBS, E. G. (1968). «An adenosine 3',5'-monophosphate-dependent protein kinase from rabbit skeletal muscle». *J Biol. Chem.*, núm. 243, p. 3763-3774.

1. ERIC KANDEL I ELS MECANISMES CEL·LULARS DE L'APRENTATGE I LA MEMÒRIA

«*Simplement, era una qüestió de temps*», així encapçalaven la pàgina web de felicitació els seus companys de l'Institut de Psiquiatria de la Universitat de Columbia, el proppassat octubre amb motiu de l'anunci de la concessió del Premi Nobel de Medicina o Fisiologia al Professor Eric R. Kandel.

L'Institut Karolinska, a qui Alfred Nobel va encomanar d'honorar «aquella o aquelles persones que haguessin fet el descobriment més important en l'àmbit de la medicina o la fisiologia», va premiar Eric Kandel pels seus «descobriments sobre els mecanismes moleculars relacionats amb els canvis en l'eficàcia de la transmissió sinàptica. Per haver demostrat, a partir del model experimental dels sistema nerviós d'un cargol de mar, que els canvis en la transmissió sinàptica tenen un paper central en els processos de l'aprenentatge i la memòria. La fosforilació de proteïnes sinàptiques representa un paper important en la generació d'una forma de memòria immediata, mentre que per a la memòria a llarg termini es requereix una síntesi de proteïnes que altera la forma i la funció de la sinapsi.»

El professor Eric Kandel va néixer a Viena el 7 de novembre de 1929, es va traslladar als Estats Units pel 1929, quan la seva família va fugir de la persecució nazi contra els jueus. Es va llicenciar en Medicina el 1956 a la Universitat de Nova York. Va especialitzar-se en Psiquiatria a la Universitat de Harvard el 1964. Va començar a investigar en neurofisiologia del cervell dels mamífers amb Wade Marshall i va passar a ser professor associat al departament de Fisiologia i Psiquiatria a la Universitat de Nova York. L'any 1974 s'incorporà com a catedràtic a la Universitat de Columbia, al Departament de Fisiologia i Psiquiatria; des de 1992 també és catedràtic del Departament de Bioquímica i Biofísica Molecular. A la mateixa Universitat de Columbia va fundar el Centre de Neurobiologia i Comportament, i encara és Investigador de l'Institut de Recerca Mèdica Howard Hughes. La recerca del professor Kandel ha estat mereixedora de més de trenta premis i dis-

tincions, entre els quals cal destacar l'Albert Lasker de Recerca Mèdica Bàsica (1983); el de la Fundació Pasarow en Neurociència (1989), el Diploma Cajal (1990), el Gerard de la Societat Americana de Neurociència (1997) i el Premi Danna en Ciències de la Salut (1997).

Com hem dit al començament, el doctor Kandel ha investigat els mecanismes que modulen la morfologia i la funció de la sinapsi en el sistema nerviós, en relació amb l'adaptació i la memòria. Les neurones són les cèl·lules especialitzades del sistema nerviós que capten la informació, la transporten i la transmeten a d'altres neurones o a d'altres cèl·lules diana, com les cèl·lules musculars esquelètiques o les cèl·lules secretores d'una glàndula. Les neurones són cèl·lules molt diferenciades, amb moltes ramificacions, entre les quals, una de sola —l'axó— és l'encarregada de transportar la informació. La sinapsi és l'estructura de les neurones especialitzada en la comunicació. La sinapsi només pot ser observada, amb detall, a través del microscopi electrònic; està formada per la part final de l'axó i una petita part de la membrana de la cèl·lula diana. El terminal axònic i la cèl·lula diana queden separats per una petita fossa. La transmissió de la informació és el resultat de l'acoblament de fenòmens elèctrics, de secreció de molècules i de la interacció entre molècules. Les neurones, com totes les cèl·lules eucariotes, tenen una composició iònica diferent de la del medi on es troben. Aquesta diferent composició iònica entre l'interior i l'exterior de la neurona genera una diferència de potencial que es coneix amb el nom de potencial de repòs. La conducció de senyals a través de les neurones es fa modificant aquest potencial de repòs en períodes de temps molt curts, de l'ordre del mil·lèsim de segon. La fluctuació del potencial es coneix amb el nom de potencial d'acció. Les fluctuacions es deuen a la presència de proteïnes específiques que regulen el pas d'ions a través de la membrana i es coneixen amb el nom de canals iònics.

El pas d'informació d'una neurona a una altra es fa per mitjà de la sinapsi. Els terminals nerviosos contenen alguns centenars o milers d'estructures esfèriques molt petites, de 0,1 μm de diàmetre, que contenen els neurotransmissors, les molècules encar-

regades de passar la informació des del terminal nerviós fins a la cèl·lula diana. Quan el potencial d'acció arriba al terminal nerviós, provoca l'obertura de canals de calci. En les zones més properes al canal de calci es produeix un augment de la concentració d'aquest ió que, al seu torn, provoca la fusió —exocitosi— de les vesícules sinàptiques. Els neurotransmissors alliberats a la fossa es difonen lliurement, fins a interaccionar amb la cèl·lula diana, la qual presenta unes proteïnes específiques o receptors sobre els quals es fixen les molècules de neurotransmissors. Cada receptor interacciona amb una o dues molècules de neurotransmissor i canvia la seva conformació deixant un petit túnel a la part central, a través del qual flueixen els ions, que generen un petit canvi del potencial elèctric de la membrana. La suma dels petits canvis de potencial de molts receptors dóna lloc a un potencial sinàptic que, si és prou gran, és capaç de generar un potencial d'acció en la cèl·lula diana.

En alguns casos els receptors postsinàptics no es comporten com un canal per on passen els ions, sinó que estan acoblats a proteïnes G, que al seu torn regulen l'activitat adenilciclasa, i és aquest darrer enzim el que fa augmentar els nivells d'AMPc intracel·lular. L'AMPc és una molècula que forma part dels anomenats segons missatgers, que provoquen una cadena de reaccions enzimàtiques en cascada dins la cèl·lula.

El professor Kandel va voler estudiar els mecanismes cel·lulars implicats en els reflexos condicionats que ja havia descrit Pavlov utilitzant gossos. La complexitat estructural del sistema nerviós dels mamífers és tan gran que es feia molt difícil de dur a terme aquests estudis. Per això, el professor Kandel va buscar un animal amb estructures molt més simples. L'*Aplysia* és un mol·lusc —lil·lac o cargol de mar— amb una estructura nerviosa relativament senzilla que presenta uns reflexos fàcils d'observar. Si es toca suauement el seu sífo, que és l'òrgan per on expulsa l'aigua i els detritus, es produeix una retracció de les brànquies. Combinant dos estímuls, un d'agradable i un d'irritant, es produeix una resposta condicionada, que es coneix amb el nom de sensibilització. La repetició dels estímuls dóna lloc a un augment en la retracció de les brànquies; segons el nombre de repeticions, l'animal recorda du-

rant unes quantes hores o dies l'augment en la retracció. Segons el temps que dura l'augment de la resposta, aquests dos fenòmens es coneixen amb el nom de sensibilització de curta durada o sensibilització de llarga durada.

Els reflexos de retracció de les brànquies estan sota el control d'unes poques desenes de neurones, amb diferents funcions: neurones sensorials, interneurons, i una neurona motora. Per tant, és possible identificar les neurones que participen en aquests reflexos i fins i tot se'n coneixen els neurotransmissors implicats. Les neurones sensorials fan servir el glutamat com a neurotransmissor, mentre que les interneurons, que tenen un paper essencial, usen la serotonina (5-HT). A més, es pot registrar l'activitat sinàptica entre les diferents neurones d'aquest circuit, punxant cada una de les neurones amb elèctrodes extraordinàriament prims, connectats a amplificadors electrònics.

El professor Kandel va prendre els models experimentals de sensibilització de curta i llarga durada en *Aplysia* com a models de memòria immediata i a llarg termini. Mitjançant els registres electrofisiològics intracel·lulars combinats amb tractaments farmacològics, a nivell cel·lular, ha pogut descriure els mecanismes moleculars bàsics que regulen aquests dos processos fisiològics. El paradigma experimental emprat era una combinació d'estímul suaus i irritants, que donaven lloc a una major retracció de les brànquies i a un augment del potencial postsinàptic de la neurona motora.

Els fenòmens de la sensibilització de curta durada es donen al terminal nerviós de la neurona sensorial, que d'una banda innerva la neurona motora i de l'altra rep la innervació de la interneurona serotoninèrgica. La serotonina actua sobre dos tipus de receptors acoblats a proteïnes G. En un cas la proteïna G està acoblada a l'adenilciclasa, mentre que en el segon cas està acoblada a la fosfolipasa C. En la ruta activada per l'adenilciclasa, s'activa un altre enzim, que es és la proteïncinasa A (PKA). Aquesta proteïna actua fosforilant tres punts essencials del terminal nerviós. Primer, inhibeix l'activitat dels canals de potassi; segon, augmenta la durada de l'obertura dels canals de calci, i, tercer, augmenta la mobi-

lització de vesícules sinàptiques. La ruta activada per la fosfolipasa C (PLC) és coincident amb alguns dels passos assenyalats per a la proteïnecinasa A. Allibera diacilglicerol de la membrana neuronal, que activa la proteïnecinasa C, que fosforila els canals de calci, allarga la seva obertura i mobilitza les vesícules sinàptiques fins a les zones actives. Cada un dels passos explicats fins ara té —individualment— la capacitat d'augmentar l'alliberació de neurotransmissor. L'acció mancomunada de tots ells dóna lloc a l'augment de l'alliberament de neurotransmissor des del terminal sensorial i, per tant, és responsable de l'augment de retracció de les brànquies.

Els fenòmens de sensibilització de llarga durada presenten dos trets fonamentals: l'activació permanent de l'activitat proteïnecinasa A (PKA) i canvis estructurals. Els canvis estructurals es deuen al creixement del terminal nerviós, que requereix la síntesi de proteïnes, i a la formació de noves connexions sinàptiques. En aquesta nova cascada enzimàtica s'han identificat les proteïnes que hi participen. La proteïnecinasa A fosforila la proteïnecinasa mitogènica activada (MAPK) i la proteïna nuclear CREB (proteïna que uneix AMPc). L'activació d'aquestes proteïnes activa els factors de transcripció que controlen l'expressió dels gens responsables del creixement del terminal nerviós.

Però, ¿aquests mecanismes són propis només de *Aplysia* o altres animals, incloent-hi l'ésser humà, tenen els mateixos mecanismes? Nombroses dades ens indiquen que aquestes dues cascades enzimàtiques bàsiques estan conservades en el teixit nerviós de tots els animals, però presenten una complexitat encara més gran. En mamífers, hi ha paradigmes experimentals com la potenciació a llarg termini (LTP), comparables a la sensibilització de llarga durada. S'ha comprovat que l'LTP està relacionada amb els fenòmens d'aprenentatge. Ratolins mutants, o ratolins transgènics que tenen mutada alguna de les proteïnes com la PKA, també tenen disminuïda la seva capacitat d'aprenentatge, així com l'LTP inhibida.

Les investigacions del professor Kandel suggereixen que l'activitat d'aprenentatge és el resultat del desenvolupament i de la

connectivitat sinàptica. Durant la formació del cervell, predominen els factors genètics que predeterminen quines estructures cerebrals estan relacionades, mentre que l'ajust fi de les connexions sinàptiques comença al final del desenvolupament i continua durant tota la vida, i és el resultat de l'experiència individual i pròpia. Per tant, tot allò que produeix el cervell, des dels pensaments més íntims fins a les expressions formulades obertament en públic, s'ha d'entendre com una seqüència de processos biològics. Els estímuls del medi i l'aprenentatge ens fan adquirir capacitats a causa de la modificació de l'efectivitat de les vies de connexió anatòmica.

El mateix professor Kandel comenta: «Contràriament a allò que alguns temen, l'anàlisi biològica no disminueix la nostra fascinació pel pensament o es trivialitza el fet de pensar per explicar-lo en termes de biologia molecular. Més aviat, la biologia cel·lular i molecular ens han ampliat la nostra visió, i han revelat les relacions desconegudes entre els fenòmens biològics i els psicològics.»

BIBLIOGRAFIA

KANDEL, E. (2000). «Cellular mechanisms of learning and the biological bases of individuality». A: KANDEL, E. R.; SCHWARTZ, J. H.; JESSEL, T. M. [ed.] *Principles of Neural Science* (4a. ed.), p. 1247-1279. Nova York: McGraw Hill.



**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2000
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE LITERATURA
CONCEDIT A
GAO XINGJIAN,
A CÀRREC DE
DOLORS FOLCH,
DE LA UNIVERSITAT
POMPEU FABRA**

Que un dia o altre donarien un Nobel a un xinès era totalment obvi, si més no per motius demogràfics. Atès que aquest Nobel ha aixecat algunes crítiques, convé ara considerar-lo a la llum dels supòsits bàsics d'acord amb els quals s'atorga un Nobel de Literatura. Jo crec que un Nobel es dóna per la combinació de tres motius bàsics: un domini excepcional de l'instrument lingüístic, una aportació rellevant en el context de la literatura en una llengua determinada, i una contribució creativa i original a la literatura mundial.

Em proposo ara de prendre en consideració aquests tres elements, un per un, i, sense ànim de substituir-me al tribunal del Nobel, analitzar si l'obra de Gao Xingjian respon a aquests tres supòsits.

1. *La primera premissa és la que pressuposa una competència lingüística excepcional per part del guardonat, i ens obliga a entrar en el tema de com el mapa lingüístic xinès i la seva escriptura no fonètica van haver d'enfrontar-se a la modernitat.*

Considerem en primer lloc la qüestió de la llengua xinesa. Allò que nosaltres anomenem xinès és més un tronc lingüístic —similar al de les llengües indoeuropees— que no pas una llengua, i de fet està dividit en múltiples dialectes: les variacions de vocabulari hi són semblants a les que separen entre elles les llengües romàniques, tot i que l'existència d'una escriptura comuna amb base no fonètica ha mantingut una estructura gramatical comuna entre ells. El dialecte més estès, el de Pequín, que també es coneix amb el nom de mandarí, és la llengua materna amb més parlants del món, 800 milions, i també es divideix al seu torn en grans dialectes. Aquesta és la llengua amb què escriu Gao Xingjian, per bé que ell mostra també un clar interès pels dialectes locals, especialment a la *Muntanya de l'ànima*.

A partir de mitjan segle XIX, el moviment revolucionari que, en resposta tant a l'agressió estrangera com a la incapacitat del pro-

pi govern, va commoure el món xinès, va tenir un impacte decisiu sobre la llengua i l'escriptura. Basant-se en l'exemple del Japó Meiji, que a partir de 1868 havia establert una llengua estàndard i havia modernitzat l'escriptura, els intel·lectuals xinesos van promoure també la fixació d'una llengua estàndard nacional, basada en el dialecte de Pequín. Però el reguitzell de guerres de la primera meitat del segle XX va impedir una implementació real del projecte.

A partir de 1949, quan els comunistes van guanyar la guerra i van aconseguir finalment una unificació efectiva del país, el govern va tenir un paper molt més decisiu en la promoció d'una llengua nacional: entre 1955 i 1959 es van succeir grans campanyes de promoció de la llengua estàndard, fins que els trasbalsos del Gran Salt Endavant i de la Revolució Cultural van absorbir les energies de tot el país. El tema va recuperar la seva vigència quan la mort de Mao Zedong va tancar aquell període de convulsions: el 1986, la Conferència Nacional de Llengua i Escripura va fixar la llengua nacional estàndard, el *putonghua*, com la llengua de totes les escoles, l'Administració i els mitjans de comunicació. El 1984, el 90 % dels xinesos l'entenia i el 50 % la usava de forma habitual. Convé tenir present, doncs, que la llengua estàndard és una normalització lingüística recent i que alguns dels seus aspectes continuen encara sota discussió.

La controvèrsia lingüística, d'altra banda, s'ha avivat al llarg del segle XX, quan el contacte del xinès amb altres llengües ha estat incomparablement més important que en èpoques anteriors i la influència d'aquests altres mons lingüístics s'ha deixat sentir fortament. Sota la seva influència, el xinès s'ha començat a estudiar i analitzar dins del marc d'uns paràmetres gramaticals més adequats a les llengües indogermàniques que a les del tronc sínid. No han faltat veus per criticar l'ús abusiu de partícules i la fixació artificial dels mots en categories gramaticals rígides que resulten alienes al xinès: una d'aquestes veus ha estat la de Gao Xingjian.

La llengua ha estat un element controvertit al llarg del segle XX; però l'escripura ha passat per transformacions autènticament revolucionàries. L'escripura xinesa es caracteritza pel fet que la unitat mínima de la transcripció no és la fonètica sinó la semàn-

tica, que és la que es plasma en un caràcter: l'equació bàsica del xinès és que tota síl·laba correspon a una paraula i tota paraula correspon a un caràcter. Diversos caràcters es poden combinar per formar una nova paraula, però no formaran mai un nou caràcter.

Aquesta escriptura era patrimoni i instrument d'una classe de lletrats que al llarg del primer mil·lenni de la nostra era va anar assumint totes les funcions de govern en detriment de l'aristocràcia local. La instauració del primer imperi, el 221 aC, va representar la victòria definitiva d'aquell estat de funcionaris i va generar la necessitat d'establir formes d'accés al poder: així van néixer exàmens i oposicions que, com és obvi, necessiten un llenguatge comú per poder ser duts a terme. L'escriptura xinesa complia, en molts aspectes, la mateixa funció que en la nostra civilització va complir el llatí: era una llengua universal, usada per un grup dirigent, amb una important literatura pròpia i amb aplicacions rellevants en el funcionament de l'estat.

La llengua amb què funcionava aquesta escriptura, i que s'anomenava *wenyan*, literalment *llengua literària*, era tan allunyada de la parla de la gent corrent com ho era el llatí de les llengües romàniques. La diferència principal entre el *wenyan* i el *baihua* —que era la llengua parlada corrent— es trobava en l'absència de polisíl·labs i de partícules, en una fixació menor de la funció gramatical de les paraules, i en la concisió extrema que caracteritzava el *wenyan*. Aquesta escriptura ha tingut sempre una expressió literària que li és molt pròpia: funciona amb frases curtes —resultat directe de la manca d'existència de subjuntius, condicionals, etc.—, la quasi-totalitat dels mots són monosíl·labs, l'ordre de les paraules és molt important, ja que els caràcters no tenen una funció gramatical expressa i, segons quina sigui la seva posició en la frase poden actuar com a verbs, adverbis, noms o adjectius, i, atès que han anat acumulant múltiples significats al llarg de mil·lennis, la creativitat es manifesta en el fet de suggerir molt amb molt pocs mots. Per una altra banda, tal com correspon a una llengua que ha estat la dels lletrats durant mil·lennis, el *wenyan* és ple d'al·lusions literàries.

La gent no va parlar mai en *wenyan*, entre altres coses per-

què no s'haurien entès. D'una banda, el xinès parlat és ple d'homòfons, molts més que no pas les nostres llengües romàniques i, per tant, els monosíl·labs inciten molt a la confusió. D'una altra, la parla quotidiana necessita expressar de forma inequívoca el gènere, el temps i el nombre, i també necessita poder expressar determinants i condicionals. A diferència del xinès clàssic, el xinès parlat funciona amb polisíl·labs, generalment bisíl·labs, però també trisíl·labs —i utilitza profusament les partícules. De fet, és una llengua tan diferent del xinès clàssic escrit com el llatí difereix de les llengües romàniques.

El *baihua*, és a dir, la llengua parlada corrent, no va ser al llarg dels segles un vehicle literari comparable al que van ser les nostres llengües romàniques. Per una banda, els qui tenien una capacitat literària educada utilitzaven tots el *wenyan*, que és el que necessitaven per estudiar i preparar els exàmens, activitats que els ocupava vint-i-cinc anys de la seva vida. Per una altra, l'escriptura en *baihua*, que existeix a partir del segle XII en les creacions literàries de carrer —teatre, contes—, no era considerada gènere literari: no es catalogava, no s'estudiava i, per tant, es difonia poc.

El *wenyan* va ser la llengua de l'administració i de l'educació fins que la crisi de l'Estat xinès al segle XIX va posar en qüestió aquesta llengua clàssica, concisa i refinada, però totalment apartada de la llengua parlada: reformistes i revolucionaris van començar a percebre-la com un obstacle tangible a la modernització del país. «Que les meves mans escriguin com els ho dicti la meua boca», reivindicava un conegut intel·lectual el 1898.

El 1905 es van abolir els exàmens imperials i aquesta abolicció va polvoritzar la utilitat i el prestigi del xinès clàssic. Poc després, el 1911, una revolució republicana, dirigida per Sun Yat-sen, va destronar el darrer emperador manxú i va proclamar la República. Però era una revolució feble, sense capacitat per actuar: el tractat de Versalles amb què acabava la Primera Guerra Mundial no la va tenir en compte per a res i, malgrat les reclamacions xineses, les possessions territorials alemanyes al Shandong no van ser retornades a la Xina sinó transferides als japonesos. Arran d'això van esclatar una sèrie de manifestacions, el 4 de maig de 1919,

tant a Pequín com a les principals ciutats del país. Concebudes inicialment com a protesta pels termes del tractat, no van tardar a convertir-se en un clam per renovar la Xina, sota el lema *Fora la barraca de Confuci*. Tot projecte de renovació passa sempre per l'educació i, per tant, el tema de la llengua es va trobar en primer pla. Tothom va coincidir a reclamar que l'educació i la premsa fessin servir el *baihua*, és a dir la llengua corrent, per tal d'aconseguir una població educada i informada capaç de modernitzar el país. Aclamat durant un segle com el gran moviment revolucionari que va iniciar la modernització del país, el moviment del 4 de maig és mirat avui amb ull crític per la forma implacable amb què va escombrar l'herència cultural: en el discurs de recepció del Nobel, Gao Xingjian hi fa al·lusió de manera crítica quan diu que:

[...] tant la revolució literària com la literatura revolucionària van dictar sentències de mort per la literatura i pels individus. L'atac a la cultura tradicional xinesa en nom de la revolució va implicar un reguitzell de prohibicions i la crema de llibres.

44

El moviment lingüístic i literari que va entronitzar el *baihua* va passar ara fa gairebé cent anys, però els enormes trasbalsos del segle XX xinès han impedit una discussió contínua del que va implicar l'abandó del *wenyan*. Els estudis gramaticals s'han fet contemplant d'una manera excessiva el model occidental, s'ha forçat la inclusió de l'anàlisi de la llengua xinesa dins de categories que no li són pròpies i que sovint resulten encarcerades, talment que s'ha fet de l'abandó del *wenyan* una qüestió de principi revolucionari.

Dins d'aquest context, Gao Xingjian ha tingut una preocupació lingüística molt marcada. Ha criticat la influència abusiva que la teoria literària occidental ha tingut sobre el xinès, la manca de formació en xinès clàssic de la nova generació, el desordre i la confusió que s'han instaurat en la llengua xinesa moderna...; s'ha oposat tant a l'ús de frases de quatre caràcters procedents d'un món cultural arcaïtzant com a la moda d'inventar paraules, ha criticat la introducció mimètica de la gramàtica occidental en el xinès

i ha denunciat la insòlita i imprecident europeització de la llengua.

Gao Xingjian ha incidit en la importància que la sonoritat té en la llengua —que en xinès és un tema molt rellevant a causa de la importància dels tons—; ha analitzat la importància de la descripció en la literatura, comparant-la amb les possibilitats que té en les arts plàstiques; ha procurat recuperar un element tan clau de l'estil clàssic com són les frases curtes, concatenades, que no expliciten la relació que les lliga; ha limitat al màxim l'ús de partícules del tipus *de, di, zhe, le*, de manera que cada caràcter assumeixi plenament la seva funció; i ha mostrat una preferència marcada pels mots monosil·làbics, limitant al mínim imprescindible els mots compostos. Tot això ens pot semblar una discussió acadèmica, però a la Xina cap discussió sobre la llengua no és innocent: el problema de Gao Xingjian als anys vuitanta van començar precisament per un article sobre literatura i modernitat.

Tota aquesta intencionalitat lingüística és molt difícil d'apreciar en les versions en llengües occidentals, ja que les nostres llengües funcionen d'una manera molt diferent de la xinesa i la traducció ha de prescindir de bona part de la tensió lingüística de l'original. Gao Xingjian va mirar de convèncer el seu traductor perquè respectés la concisió extrema de les frases i l'absència de temps verbals, però al final va ser el traductor qui el va convèncer a ell que el francès també tenia unes normes de funcionament pròpies.

45

2. La segona premissa és la que pressuposa una aportació rellevant per part de l'autor a la seva pròpia literatura i ens obliga a situar Gao Xingjian, molt breument, en el context del que ha estat la literatura xinesa del segle XX.

A partir del segle XX, la llengua i escriptures xineses es van trobar sotmeses a la influència de cultures estranyes en una mesura incomparable a la de qualsevol època anterior. La influència cultural del món exterior, l'Occident i el Japó, va venir reforçada per la primera gran allau de traduccions —entre les quals destaquen, pel seu nombre, *Una casa de nina*, d'Ibsen i *La Dama de les Camèlies*, de Dumas—: el contrast entre els diferents mons cultu-

erals va refermar el moviment de crítica interna, tal com expressen aquestes paraules de Lu Xun:

La lectura dels llibres xinesos m'omple de calma i m'aïlla de la vida real. La lectura de llibres estrangers em posa en contacte amb la vida i em fa venir gaues d'intervenir-hi. Per més que els llibres xinesos t'incitin a viure en el món, respiren l'optimisme dels morts. En els llibres estrangers hi ha decadència i pessimisme, però són la decadència i el pessimisme dels vius.

46 Ecllosió intel·lectual amb què la Xina va encetar el segle XX va ser conduïda en gran part pels *liuxuesheng*, els qui han fet estudis a l'estranger, és a dir, la generació d'intel·lectuals formats principalment a les universitats japoneses, americanes i franceses: és important retenir que, malgrat la seva genuïna composició xinesa, tot el moviment intel·lectual va venir fermentat des de l'exterior. La revista més important de les moltes que aparegueren durant aquests anys, la *Nova Joventut*, fundada el 1915, dedicava la meitat de les seves pàgines a traduccions. Va ser també en aquesta revista on va aparèixer un provocador article de Hu Shi (1891-1962) que qualificava la literatura xinesa tradicional de literatura morta i reclamava l'ús del *baihua*; i va ser aquí també on Lu Xun va publicar *El diari d'un boig*.

La revolució literària va produir una allau d'excel·lents escriptors, el més important dels quals fou sens dubte Lu Xun (1881-1936). Com tota la seva generació, Lu Xun va rebre de ple l'impacte de la literatura estrangera i en va traduir moltes obres. Revolucionari convençut, Lu Xun és també una de les persones més cultes, sensibles i incisives de tot el segle XX: la seva obra és una aportació extraordinària a la literatura universal. Però el seu fervor revolucionari va impedir que l'Acadèmia sueca li atorgués el Nobel: van preferir adjudicar-lo a una novel·la sobre la Xina escrita per la filla d'uns missioners americans, Pearl Buck.

Lu Xun no era de cap manera un cas aïllat. Altres grans escriptors —autors tant de grans novel·les com de textos importants

de crítica literària— van sorgir també durant aquest primer terç del segle XX.

Mao Dun (1896-1981), el més familiaritzat de tots els seus contemporanis amb els corrents literaris europeus, va optar per la descripció objectiva del fet social: en les seves novel·les més importants, *Cucs de seda en primavera* i *Mitjanit*, dóna molta més importància a les forces socials que als destins individuals. Amb el triomf de la revolució, el 1949, el van fer ministre de Cultura i ja no va escriure mai més res d'interès.

Lao She (1899-1966) era també un gran coneixedor tant de la literatura xinesa com de l'occidental, i va explotar de forma magistral les possibilitats del *baihua*, introduint en les seves obres el llenguatge viu i pintoresc dels carrers de Pequín. Cobert d'honors inicialment, el van fer vicepresident de l'Associació d'escriptors, però durant la Revolució Cultural els guàrdies rojos el van torturar i ofegar en un parc de Pequín.

Ba Jin (1904 —), l'altre gran novel·lista, autor de *Família*, se'n va sortir millor. Malgrat que durant la Revolució Cultural va ser durament perseguit a causa de les seves simpaties anarquistes, encara és viu i durant molts anys el seu nom va sonar com a candidat al Premi Nobel.

Molts d'aquests escriptors van decidir abandonar el caos de la Xina nacionalista de Chiang Kai-shek i dels senyors de la guerra i van fer cap al refugi dels comunistes a Yan'an. Però allí, la seva actitud crítica, lúcida i apassionada no va tardar a xocar amb el creixent totalitarisme de Mao: una intervenció famosa de Mao sobre art i literatura feta a finals dels anys trenta transformava la revolució literària en literatura revolucionària i iniciava un període de total submissió de la literatura als interessos de l'estat: com acostuma a passar, la revolució va engolir els intel·lectuals que n'havien estat l'avantguarda.

Durant els trenta anys següents, del 1949 al 1979, any de la mort de Mao, la literatura xinesa no té gens d'interès. Els escriptors van quedar adscrits a l'Associació Xinesa d'Escriptors, que assimilava el seu estatus al de funcionaris al servei de l'estat, de manera que els proporcionava feina fixa i seguretat social. Com-

pletament lligats, ningú no va gosar badar boca fins al 1956: quan el discurs de les Cent Flors, pronunciat per Mao, els va incitar a opinar i criticar, però el recel els va mantenir en silenci durant gairebé un any. Quan, al final, van començar a opinar i emetre lleugeres crítiques, Mao va llançar, contra els qui s'havien descobert, una repressió duríssima, el moviment antidretà del 1956, que va desterrar al camp una gran part dels intel·lectuals, professors i professionals de la cultura. Quan començaven a tornar cap a casa, la Revolució Cultural, entre 1966 i 1976, els va tornar a anihilar.

Entre 1979 i 1989, el panorama intel·lectual xinès es va reorganitzar de manera notable. Tots els escriptors continuaven enquadrats per l'Associació xinesa d'escriptors i, a través d'ella, l'Estat conservava formes de pressió molt importants sobre els escriptors: però la Xina s'obria de nou al món exterior en un clima més distès.

Per una banda, a l'igual del que havia passat a començament de segle, l'impacte de la literatura occidental va tornar a ser decisiu. Les traduccions es van multiplicar a un ritme sense precedents i la seva qualitat era sovint pèssima: sota la seva influència es va iniciar una distorsió gramatical del xinès. En intentar assimilar-lo a les formes d'expressió occidental, es va potenciar una mena d'escriptura que té molt poc en compte el que són les possibilitats lingüístiques del xinès: s'ha dit que s'escribia «literatura estrangera en xinès».

Per una altra, en el clima de distensió política dels primers anys de Deng Xiaoping, els escriptors van començar a narrar les seves experiències al llarg d'aquests anys. Aquest moviment es va conèixer amb el nom de «literatura de les cicatrius», *shanghen*, i va produir una allau de llibres referents a la revolució cultural. Com que tots els qui havien estat enviats a reeducar-se al camp també havien entrat en contacte amb el món rural i amb unes minories nacionals que fins aleshores els havien estat completament desconegudes, un cop passat el tràmit freudiana de llepar-se les cicatrius, els escriptors van començar a descriure aquests mons rurals o nacionals que els eren desconeguts,

i va aparèixer així un altre moviment, el de «buscar les arrels», *xungen*. Al costat d'aquests moviments que eren políticament correctes, un altre grup, especialment els poetes, intentava anar més enllà, i, escamnats per totes les repressions hagudes, escrivien amb un llenguatge deliberadament obscur: és la *menglengshi*, la «poesia de les boires».

Ja en els anys vuitanta, un escriptor lligat al moviment de renovació intel·lectual, Wang Meng, va arribar a ministre de Cultura, i un escriptor notable, Lu Wenfu, autor del *Gourmet*, va ser president de l'Associació xinesa d'escriptors. Liu Binyan feia aleshores funcions de defensor del poble i en la seva columna del *Renmin Ribao* denunciava incansablement la corrupció i abusos de poder dels càrrecs del partit. Precisament en aquesta dècada dels vuitanta també van començar a publicar Zhang Xinxin, Zhang Xiangliang, A Cheng, Mo Yan i tants d'altres: es tracta en tots els casos d'escriptors molt bons, interessats per la llengua i la teoria literària i amb unes experiències vitals que els proporcionaven moltes coses per explicar. Va ser dins d'aquest clima d'ebullició literària i intel·lectual, i també de relativa llibertat plena d'esperança, que Gao Xingjian va començar a publicar.

Gao Xingjian va néixer el 4 de gener de 1940 a la província de Jiangxi, a l'est de la Xina. El seu pare treballava en un banc i la seva mare era una artista aficionada que sempre va encoratjar les inclinacions del seu fill per l'art i el teatre: a ella es deu probablement l'extraordinària sensibilitat que Gao Xingjian mostra en tots els seus llibres pel punt de vista de les dones. El 1962 es va graduar en francès a l'Institut de Llengües Estrangeres de Pequín. A través del francès —que és l'única llengua estrangera que coneix— va entrar en contacte amb la literatura occidental. Ha estat i és un lector incansable, i ha adquirit un coneixement formidable de la literatura francesa i, també, de l'europea en general. Durant la Revolució Cultural, en què fou actor i víctima, com tothom, va continuar escrivint sense publicar mai res, destruint sovint el que havia escrit. En el discurs pronunciat arran de la concessió del Premi Nobel, Gao explica clarament com prengué consciència de la importància de la literatura:

Durant els anys en què Mao va imposar una dictadura total, ningú no podia escapar. Els monestirs amagats al cim de les muntanyes que en època feudal havien proporcionat refugi als intel·lectuals van ser destrossats, i escriure, fins i tot en secret, equivalia a arriscar la pròpia vida. Per preservar l'autonomia intel·lectual no hi havia altre camí que el de parlar amb un mateix, i això s'havia de fer en el secret més total. He de dir que va ser en aquesta època, en què la literatura era totalment impossible, quan em vaig adonar de per què era tan essencial: la literatura permet que una persona conservi la consciència humana.

Durant la primera part de la dècada dels vuitanta, Gao Xingjian va començar a publicar contes i assaigs. Des del primer moment la seva obra va ser polèmica. Les obres de teatre, que introduïen a la Xina el teatre de l'absurd, resultaven incòmodes i els seus assaigs teòrics provocaren una irrefrenable irritació en les esferes de poder. La publicació, el 1981, del seu *Primer assaig sobre les tècniques de l'art modern* —en què explora les possibilitats que tenen per a la literatura xinesa les tècniques narratives procedents de la literatura occidental—, i l'estrena de l'obra de teatre *La Parada d'autobús* van desencadenar la *Campanya contra la pol·lució espiritual* del 1983, un nou moviment contra els intel·lectuals i la influència de les idees occidentals. Per evitar el clima opressiu en què malvivia, Gao va aconseguir un anticipament d'un editor i va anar-se'n cap a les remotes muntanyes del Sichuan, des d'on va iniciar un recorregut del Yangzi que el duria a través de poblacions i paisatges recòndits a tota mena de racons de món. Prenent com a base els materials i les vivències recollits al llarg d'aquell any, va construir després la *Muntanya de l'ànima*, la seva novel·la principal.

A partir de 1986, les seves obres van començar a prohibir-se i el 1988 va fugir de la Xina i es va instal·lar a França; tot i això no va abandonar el partit comunista xinès fins després de la massacre de Tian'anmen el 1989. Va passar set anys escrivint la *Muntanya de l'ànima*, durant els quals es va guanyar la vida com a pintor. Ell mateix ha explicat que no escrivia per publicar sinó per a ell mateix, pel consol que trobava en la literatura, i que per

poder ser lliure d'escriure es guanyava la vida d'una altra manera. Les seves obres de teatre li van valer un nom a França i la publicació de la *Muntanya de l'ànima* va rebre una crítica entusiasta.

La *Muntanya de l'ànima* és una llarga novel·la que explica el viatge, tant iniciàtic com real, de l'autor des de les terres altes del Sichuan fins a la desembocadura del riu Yangzi. El viatge s'inicia a la Xina profunda, en un món ple de records de bandits, de tradicions ancestrals que continuen ben vives i d'encanteris taoistes de tota mena. lluny tant de la Xina oficial com de la confuciana. Tota la novel·la està impregnada d'una sensibilitat per les formes, ombres i colors en què pintura i poesia es creuen. Aquesta ambivalència era constant a la Xina clàssica i és lògic recuperar-la amb Gao Xingjian, no sols per la seva qualitat de pintor-escriptor, sinó també per la seva voluntat de recuperar els valors bàsics de la literatura xinesa. La trama argumental de la novel·la consisteix en la recerca d'aquesta muntanya màgica, però el text en si mateix resulta irreductible a un gènere únic. En aquest llibre hi cap tot: històries d'amor, contes curts, divagacions antropològiques, reculls de cançons populars, històries múltiples que de vegades acaben i d'altres no, sense lligans explícits entre elles: tot plegat en el més pur estil de la novel·la xinesa.

La seva darrera obra, *El llibre d'un home sol*, és un text de caràcter bàsicament autobiogràfic centrat en els seus records de la Revolució Cultural. A la Xina, a partir del moviment de la *literatura de cicatrius*, han aparegut nombrosos llibres que parlen de la Revolució Cultural, però el de Gao Xingjian és diferent dels altres. No amaga haver estat un Guàrdia Roig, ni es fon amb *mea culpas*, i tampoc no magnifica el seu paper de víctima: descriu, a través de les experiències pròpies, la immensa solitud que van representar aquells deu anys. Encara més que a la *Muntanya de l'ànima*, el sexe és aquí utilitzat de manera sistemàtica per defugir l'angoixa, per crear cercles de tendresa on poder-se refugiar. L'amor, el sexe, a l'igual que la literatura, són importants per trencar la solitud i sentir-se viu, no comporten obligació ni compromís i necessiten d'una renovació constant.

Dins del món xinès, Gao Xingjian és ara una persona més

criticada que no pas apreciada: el govern xinès l'ha denigrat, i el moviment democràtic a l'exili no s'hi ha reconegut.

Ara bé, ell ha representat una innovació real en el món de les lletres xineses: ha experimentat amb la llengua, recuperant la concentració d'imatges i la versatilitat del xinès clàssic; ha introduït l'escenografia simbòlica de l'òpera clàssica de Pequín en el teatre contemporani, tenint també en compte les experiències del teatre de Brecht; ha adequat l'estructura tradicional de la novel·la xinesa a l'expressió de vivències i itineraris espirituals profundament moderns; ha aconseguit mirar de forma freda la terrible experiència que va representar la Revolució Cultural, i ha recuperat una tradició interrompuda de compaginar un intens coneixement de la literatura estrangera amb un ofici impecable d'escriptor educat en la tradició xinesa.

Gao Xingjian ha escrit a partir de la seva formació i de la seva experiència a la Xina. Com ell mateix explica, ha escrit per a ell mateix, pel plaer que això li produïa, sense preocupar-se de quin públic el llegiria, i sense estar sotmès a pressions externes de cap mena. És precisament aquest clima de llibertat el que li ha permès obrir nous camins a la literatura xinesa, integrant la sòlida formació tradicional amb l'experimentació avantguardista.

3. La tercera premissa és la que pressuposa que l'autor ha fet una contribució creativa i original a la literatura mundial.

Per començar, Gao Xingjian té una voluntat decidida d'escriptor universal. Per dir-ho amb les seves mateixes paraules:

A causa del lloc en què vaig néixer i de la llengua que utilitzo, les tradicions culturals de la Xina viuen dins meu de forma natural. La cultura i la llengua tenen sempre una relació estreta i per això es formen modes de percepció, pensament i articulació que són característiques i relativament estables. Però cal tenir present que la creativitat d'un escriptor comença precisament a partir del que ja ha estat articulat en la seva llengua i es dirigeix cap a allò que no ha estat correctament articulat en aquesta llen-

gua. [...] La literatura transcendeix els límits nacionals i aporta revelacions profundes sobre la universalitat de la naturalesa humana. A més a més, l'escriptor d'avui dia rep moltes influències multiculturals que li arriben de fora de la cultura de la seva pròpia raça; emfatitzar les característiques culturals d'un poble, excepte si és per promoure el turisme, resulta inevitablement sospitós. La literatura transcendeix la ideologia, les fronteres nacionals i la consciència racial de la mateixa manera en què la vida d'un individu transcendeix bàsicament aquest o aquell *-isme*.

Malgrat la importància que l'Acadèmia sueca ha atorgat a les seves peces de teatre i la bona acollida que han tingut en escenaris europeus i americans abans del Nobel, crec que la seva aportació a la literatura universal se centra indiscutiblement en les seves dues novel·les, en especial la *Muntanya de l'ànima*, que ha convertit la Xina profunda en un patrimoni universal.

En el món globalitzat en què vivim, el problema de com compaginar tradició pròpia i modernitat és un problema important per a aquelles cultures que es desenvolupen fora dels corrents literaris occidentals. Gao Xingjian ha fet un esforç molt important per compaginar tradicions culturals molt diverses i ha mirat de fer-ho sense perdre la seva veu xinesa: jo crec que per això ha estat guardonat per l'Acadèmia sueca.

Des del moment en què se li va concedir el Nobel van sorgir veus acusant a l'Acadèmia sueca d'haver-ho fet per motius polítics. Per començar, convé aclarir que, en llegir els articles sobre aquest tema quedava ben clar que ningú dels qui parlaven no havia llegit les novel·les de Gao Xingjian. Però és clar que l'Acadèmia sueca l'hi va atorgar per motius polítics: el rar és quan no ho fa. Als xinesos els tocava guanyar-ne un: també era estrany que no n'haguessin donat mai cap a un xinès. I era més fàcil que el donessin a algú amb una posició crítica que a un escriptor ben relacionat amb el poder, ja que tal com és l'Estat xinès, aquest darrer supòsit és nefast per a la creativitat.

Tot i això, tenien mitja dotzena d'escriptors per triar. Però Cao Xingjian encarnava millor que ningú la lluita de l'individu a

través de la literatura per conservar la pròpia identitat contra un estat totalitari. I jo crec que és també per això que li han atorgat el Nobel, perquè, tal com ell mateix expressa en el seu discurs d'acceptació, ha convertit la literatura en la màxima expressió de la llibertat individual i ha fet de la llibertat la condició *sine qua non* per al desenvolupament de la creació literària.

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2000**

**SOBRE EL
PREMI NOBEL DE QUÍMICA
CONCEDIT A**

**ALAN J. HEEGER,
ALAN G. MacDIARMID I
HIDEKI SHIRAKAWA,**

**A CÀRREC DE
CONCEPCIÓ ROVIRA,
DE L'INSTITUT DE CIÈNCIA
DE MATERIALS DE BARCELONA
DEL CONSELL SUPERIOR
D'INVESTIGACIONS CIENTÍFIQUES**

**«METALLS SINTÈTICS»: UN NOU PAPER
PER ALS POLÍMERS ORGÀNICS. EL PREMI NOBEL
DE QUÍMICA DE L'ANY 2000**

L'Acadèmia de Ciències Sueca ha guardonat amb el Premi Nobel de Química de l'any 2000 dos químics, Alan G. MacDiarmid i Hideki Shirakawa i un físic, Alan J. Heeger «pel descobriment i el desenvolupament dels polímers orgànics conductors» que han obert la porta a una gran diversitat de possibilitats científiques i tecnològiques dins el camp dels nous materials.

En el comunicat de premsa de l'Acadèmia de Ciències Sueca on es comunica la concessió del Premi es dona la justificació següent:

Plàstics que condueixen l'electricitat

Normalment hom pensa que els plàstics, a diferència dels metalls, no condueixen el corrent elèctric i, de fet, s'utilitzen per aïllar els fils de coure dels cables elèctrics ordinaris. Els llorejats amb el Premi Nobel de Química d'enguany són recompensats per un descobriment revolucionari: un plàstic pot esdevenir, després de certes modificacions, conductor de l'electricitat.

Les matèries plàstiques són un tipus de polímer, macro-molècules en les quals l'estructura es repeteix regularment en cadenes llargues. Perquè un polímer pugui conduir l'electricitat, ha de tenir alternança d'enllaços dobles i senzills entre els seus àtoms de carboni. També ha d'estar «dopat», cosa que consisteix a treure-li electrons (per oxidació) o a donar-li'n (per reducció). Aquests «forats» o electrons suplementaris es poden desplaçar al llarg de tota la molècula, que es torna, d'aquesta manera, conductora de l'electricitat.

Heeger, MacDiarmid i Shirakawa van fer el seu descobriment a finals dels anys setanta i des d'aleshores han fet dels polímers conductors un camp de recerca de gran importància tant per als químics com per als físics. Aquestes investigacions han do-

nat lloc també a importants aplicacions pràctiques. Els plàstics conductors s'usen, o bé estan en curs de desenvolupament industrial, entre d'altres aplicacions com a antiestàtics per a pel·lícules fotogràfiques, pantalles protectores de les radiacions electromagnètiques en telèfons mòbils i pantalles d'ordinadors i finestres «intelligents» (que poden eliminar la llum solar). A més, els polímers semiconductors han estat recentment desenvolupats com a díodes emissors de llum i transistors en cel·les solars i pantalles de telèfons mòbils i minitelevisors.

La recerca en els polímers conductors està també estretament relacionada amb el ràpid desenvolupament de l'electrònica molecular. En el futur podrem produir transistors i altres components electrònics consistents en una sola molècula, fet que repercutirà en un increment de la velocitat i una disminució de la mida dels ordinadors. Un ordinador com el que avui portem en una maleta cabrà en un rellotge de polsera...

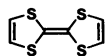
El fet que dins la terna guardonada amb el Nobel de Química es trobi un físic, Alan J. Heeger, és una clara indicació del caràcter intrínsecament interdisciplinari del camp dels nous materials, on cal reunir els coneixements de la propietat que es vol per al material, la manera d'arribar a la seva síntesi i l'estudi de la relació entre l'estructura molecular i la supramolecular amb les propietats i prestacions buscades. De fet, la publicació del descobriment dels polímers conductors es va fer primerament el 1977 en una revista de Química, *The Journal of Chemical Society, Chemical Communications*, en l'article «Síntesi de Polímers Orgànics Conductors de l'electricitat: Derivats Halogenats del Poliactilè (CH)_x», d'Hideki Shirakawa, Edwin J. Louis, Alan G. MacDiarmid, Chwan K. Chiang i Alan J. Heeger i seguidament, també el 1977, es va publicar en una revista de Física, *Physical Review Letters*, l'article «Conductivitat Elèctrica en el Poliactilè Dopat», de C. K. Chiang, C. R. Fincher, Y. W. Park, A. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau i A. G. MacDiarmid.

El descobriment dels polímers conductors es va fer durant la dècada dels setanta, quan el desenvolupament dels polímers es-

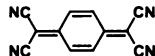
tava molt avançat i la indústria d'aquests materials tenia una gran importància, atesa l'enorme quantitat d'aplicacions que tenen. Hem de pensar que tots els plàstics són polímers, macromolècules constituïdes per unitats que es repeteixen formant llargues cadenes com si fossin un collaret de perles.

Els industrials adoren els plàstics perquè són lleugers, barats i fàcils de processar. Però en el camp de l'electrònica els plàstics es feien servir únicament per fabricar les capses que envolten els circuits i cobrir els cables que fan el treball electrònic.

Pocs anys abans que Shirakawa, MacDiarmid i Heeger descobriessin el 1977 com aconseguir que un polímer orgànic es comportés com a conductor, la idea que un plàstic pogués conduir l'electricitat de la mateixa manera que ho fa un metall era inversemblant, ja que tradicionalment tots els compostos orgànics han estat considerats com a aïllants elèctrics i, de fet, la gran majoria ho són. Malgrat això, ja a l'any 1911, McCoy i Moore van publicar al *Journal of the American Chemical Society* un article amb el títol «Amalgames orgàniques: substàncies amb propietats metàl·liques compostes en part d'elements no metàl·lics» en el qual conclouen: *«pensem que els radicals orgànics de les nostres amalgames es troben en l'estat metàl·lic i, per tant, que és possible preparar substàncies metàl·liques constituïdes per elements no metàl·lics»*. Van haver de passar més de seixanta anys perquè se sintetitzés, el 1973, el primer metall orgànic, el complex format per una molècula orgànica donadora: el tetrathiafulvalè (TTF) i una altra d'acceptadora: el tetracianoquinodimetà (TCNQ).



TTF

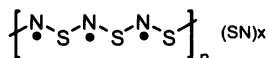


TCNQ

Des d'aquest descobriment, la recerca en el camp dels metalls orgànics va créixer exponencialment i la dècada dels setanta pot ser considerada com a fonamental per a l'inici d'un nou camp de la ciència de materials, el dels *metalls sintètics*, que també ha portat al descobriment de *superconductors orgànics*. Aquests compostos van fascinar des del començament els investigadors químics

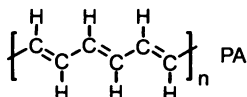
i físics, ja que els compostos orgànics, tant si són monomèrics com polimèrics, permeten una enorme varietat d'estructures per modificacions sintètiques, i es va fer possible tenir conductivitat elèctrica i superconductivitat en compostos fets a mida. La perspectiva de combinar la recerca bàsica amb la tecnologia va atreure una enorme quantitat d'investigadors cap a aquesta àrea. En aquest context, és fonamental el descobriment dels polímers conductors l'any 1977, pel qual s'ha concedit el Premi Nobel a Shirakawa, MacDiarmid i Heeger.

Un altre descobriment important que va precedir el desenvolupament dels polímers orgànics conductors va ser la constatació, l'any 1975, que el polímer inorgànic polinitrur de sofre $(\text{SN})_x$, constituït per àtoms no metàl·lics, té una conductivitat a temperatura ambient de $10^4 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$, que és quasi comparable a la conductivitat del coure ($\approx 10^5 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$). A més, aquest polímer, format per unitats repetitives radicalàries $(\text{NS}\cdot)$, es comporta com un superconductor a molt baixa temperatura.



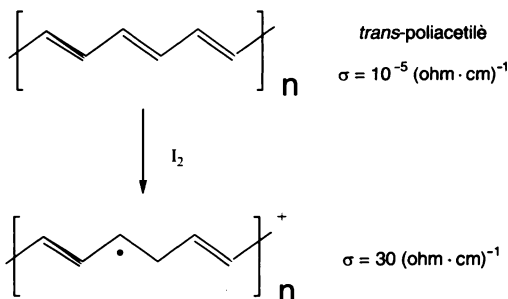
59

Precisament, Alan MacDiarmid i Alan Heeger estaven investigant conjuntament aquest polímer metàl·lic a Filadèlfia al mateix temps que a l'altra part del món, al Japó, Hideki Shirakawa desenvolupava una nova síntesi del poliacetilè (PA), polímer on la unitat repetitiva és CH , que li va permetre obtenir-lo en forma de pel·lícula amb proporcions controlades dels isòmers *cis* i *trans* en lloc de la pols negra que s'obtenia abans. A més, per accident, va afegir a la reacció 1.000 vegades més de catalitzador de la quantitat que hi afegia habitualment i, per a sorpresa seva, aquest cop va aparèixer una pel·lícula platejada en comptes de la pel·lícula negra que obtenia habitualment.



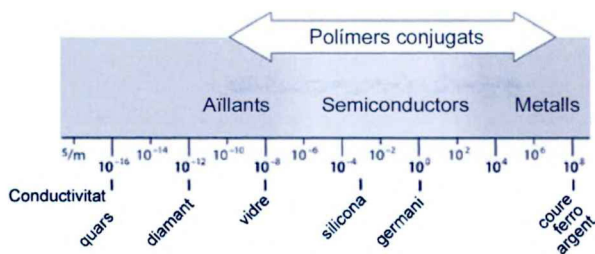
MacDiarmid va ser convidat a Tòquio per donar un seminari sobre el polinitrur de sofre (SN)_x i es va trobar amb Shirakawa durant la pausa per prendre cafè. L'intercanvi de les seves experiències amb les pel·lícules brillants dels dos polímers va ser el desllorigador del descobriment dels polímers orgànics conductors. Quan MacDiarmid va tenir coneixement del fet que Shirakawa tenia una pel·lícula de poliacetilè (PA) platejat el va convidar a la Universitat de Pennsilvània per estudiar l'oxidació del PA utilitzant com a oxidant vapors de iode. Quan Shirakawa va observar que les propietats òptiques de la pel·lícula de PA variaven en oxidar-lo, MacDiarmid va proposar que el físic amb qui col·laborava, Alan Heeger, mesurés les propietats elèctriques de les pel·lícules. En mesurar la conductivitat de la pel·lícula de *trans*-poliacetilè oxidat amb iode la seva alegria va ésser enorme, ja que la conductivitat era deu milions de vegades més gran que la de la pel·lícula sense oxidar! i tenia una conductivitat $\sigma = 30 \text{ (ohm} \cdot \text{cm)}^{-1}$ tan alta com la de molts metalls.

60



Així van començar l'aventura dels polímers conductors els tres investigadors guardonats amb el Nobel del 2000 i des d'aleshores s'han sintetitzat molts tipus de polímers conductors amb un gran interval de conductivitats i el camp ha crescut enormement, donant lloc a moltes aplicacions noves.

Tots tres continuen treballant activament en el camp en diferents universitats, pertanyen al Consell Científic Assessor de les diverses edicions del Congrés de Metalls Sintètics i són coeditors



de diverses revistes, d'entre les quals destaca *Synthetic Metals*, de la qual Alan Heeger és l'editor en cap.

Per tal d'entendre com es va arribar al descobriment dels polímers conductors ens hem de preguntar quins coneixements van permetre els químics MacDiarmid i Shirakawa pensar que l'oxidació del polímer orgànic poliacetilè podria donar lloc a un pel·lícula conductora. Les eines bàsiques per entrar en el món fascinant dels metalls orgànics són, a més de la síntesi orgànica, els criteris de la química supramolecular i d'estat sòlid i els coneixements dels principis que governen el transport electrònic.

61

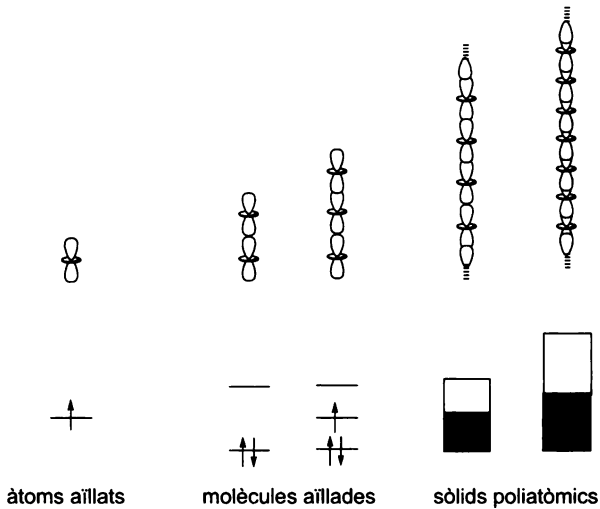
LA CONDUCTIVITAT

Per tal que qualsevol material condueixi el corrent elèctric, els electrons que componen els seus àtoms s'han de moure lliurement en una direcció determinada per a l'aplicació d'un camp elèctric. Hi ha dues condicions bàsiques perquè això pugui passar:

- Formació de bandes d'energia
- Ocupació parcial de les bandes en què es troba el nivell de Fermi

Les bandes d'energia es formen per interacció dels orbitals i, així com la interacció de dos orbitals dóna lloc a un orbital enllaçant i un altre d'antienllaçant d'energia més gran, la interacció de $2n$ orbitals dóna lloc a n orbitals enllaçants i n d'antienllaçants.

L'energia dels orbitals del mateix tipus és molt similar, per la qual cosa no es tenen orbitals discrets, sinó un continu d'orbitals que s'anomena *banda d'energia*. La banda formada amb els orbitals enllaçants s'anomena *banda de valència* i la formada pels orbitals no enllaçants, *banda de conducció*. La figura següent mostra la formació de la banda de valència mitjançant la interacció d'àtoms que tenen un sol electró a l'orbital ocupat de més alta energia.



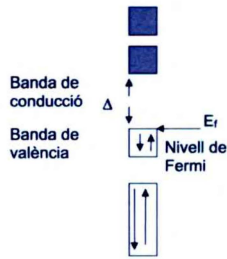
De la mateixa manera que les característiques dels orbitals moleculars defineixen les propietats de les molècules, les característiques de les bandes determinen el comportament electrònic dels sòlids. En l'esquema següent es presenten algunes de les relacions que es poden establir entre els termes normalment usats per a les molècules aïllades i els que es fan servir per als sòlids.

Molècules aïllades



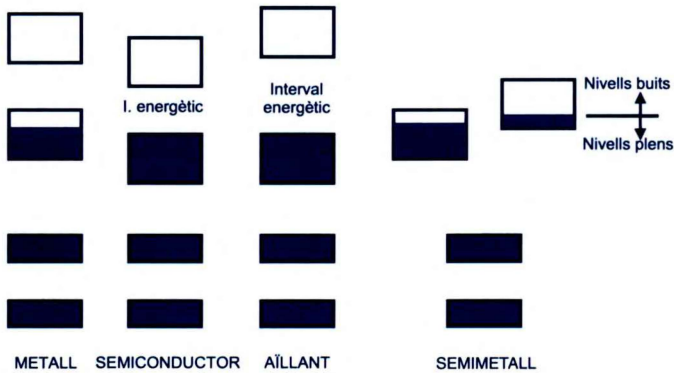
Orbitals moleculars
HOMO
LUMO
Distorsió de Jahn-Teller
Degeneració d'orbitals

Sòlids



Orbitals cristal·lins
Banda de valència
Banda de conducció
Distorsió de Peierls
Densitat d'estats

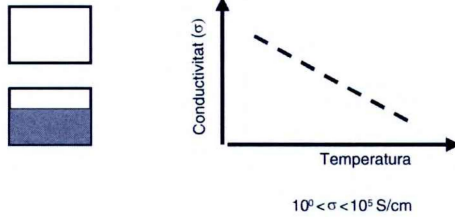
Depenent del nombre d'electrons que ocupin les bandes i de com sigui la separació energètica que hi ha entre elles, les propietats del sòlid seran diferents. En l'esquema següent veiem diferents situacions:



En el cas d'un metall, la banda de valència està ocupada parcialment, per la qual cosa els electrons es poden moure gairebé lliurement dins la banda amb una despesa energètica molt baixa.

La confirmació que un compost és metàl·lic la dóna la mesura de la seva conductivitat elèctrica, que és alta a temperatura ambient i augmenta quan disminueix la temperatura.

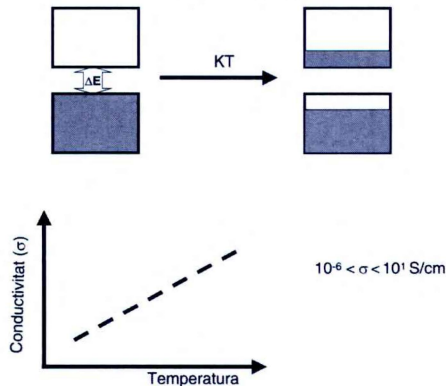
METALL



Un semiconductor té una banda totalment plena i una altra, situada a energies una mica superiors, que està totalment buida, per la qual cosa es necessita energia tèrmica per tal que els electrons passin d'una banda a l'altra. Quan la banda de conducció està parcialment plena, ja estem en les condicions idònies perquè pugui tenir lloc el transport electrònic. La conductivitat dels semiconductors és més baixa que la dels metalls i disminueix quan decreix la temperatura.

64

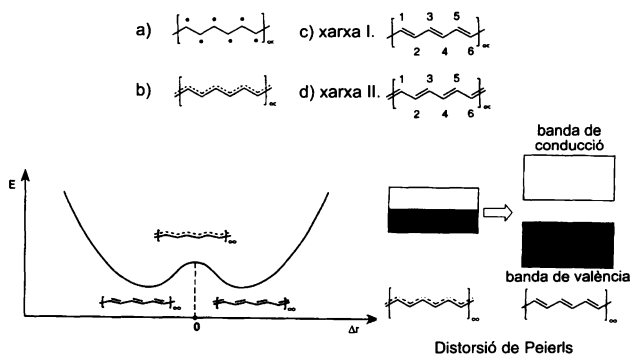
SEMICONDUCTOR



Quines característiques ha de tenir un polímer perquè es donin les condicions necessàries per a la conductivitat? Si ens fixem en l'exemple clàssic, el poliacetilè $(CH)_x$, veiem que és un polímer conjugat, és a dir, que cadascun dels carbonis de la cadena principal està enllaçat mitjançant enllaços σ a només tres àtoms, en el cas del poliacetilè dos carbonis i un hidrogen. En un polímer conjugat, tres dels quatre electrons de cada carboni resideixen en orbitals σ enllaçants, mentre que el quart resideix en un orbital p_z deslocalitzat. Els orbitals p_z dels carbonis veïns se superposen, amb la qual cosa es forma una banda d'energia que, segons si està totalment o parcialment plena, donarà lloc a propietats semiconductoras o metàl·liques.

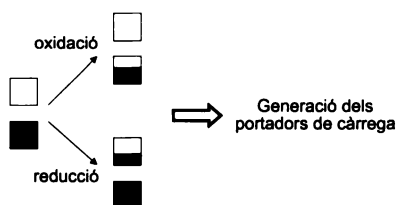
En el cas concret del poliacetilè, en què la unitat repetitiva, CH, té un sol electró en l'orbital p_z , la banda que es forma està plena només fins a la meitat, amb la qual cosa es compleixen les dues condicions perquè sigui un metall. No obstant això, com hem dit abans, el poliacetilè neutre no és un bon conductor i, de fet, els estudis experimentals mostren que és un semiconductor amb un interval energètic més gran que 1,5 eV. Aquest fet és degut a la denominada distorsió de Peierls, que dóna lloc a dos estats fonamentals degenerats de més baixa energia en els quals els orbitals π no estan deslocalitzats sinó que es formen enllaços localitzats amb alternança

El poliacetilè



d'enllaços dobles i senzills tal com es veu en les representacions c) i d) de la figura de la pàgina anterior. Aquesta distorsió, que representa doblar la cel·la, obre un interval energètic al nivell de Fermi, fet pel qual el compost es comporta com a semiconductor.

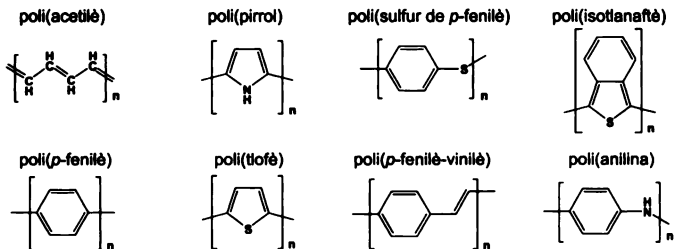
Per tal de fer metàl·lic el poliacetilè, o qualsevol altre polímer conjugat que presenti els mateixos fenòmens, s'ha de buidar mitjançant una oxidació (pèrdua d'electrons) la banda de valència o bé omplir mitjançant una reducció (guany d'electrons) la banda de conducció, amb la qual cosa una de les dues bandes estarà semiocupada i tornarem a tenir les condicions necessàries perquè els electrons es desplacin dins de la banda. Aquest procés s'anomena normalment *dopatge* i comporta, no sols una variació en l'estructura electrònica del polímer, sinó una modificació de la seva morfologia i composició, perquè el polímer passa de ser neutre a estar carregat positivament o negativament i, per tal de mantenir l'electroneutralitat, incorpora contraions.



Així, doncs, els requisits necessaris per obtenir un polímer conductor són dos:

- Que el *polímer* sigui *conjugat*, és a dir, que presenti alternança d'enllaços dobles (enllaços π) i senzills (enllaços σ) per tal de *formar bandes d'energia*.
- *Dopar el polímer* (oxidació o reducció incompleta) per tenir una *ocupació parcial de la banda*.

En la figura següent es mostren diferents polímers conjugats que són semiconductors amb intervals energètics entre la banda de valència i la de conducció molt diferents i que mitjançant dopatge donen lloc a materials conductors:



Depenent del tipus de dopant, del grau de dopatge i de les característiques morfològiques i estructurals, els polímers conjugats tenen propietats de transport molt diferents. En la taula següent es resumeixen els intervals de conductivitats (σ) assolits amb diferents polímers conjugats:

Polímer	σ (S/cm)
Poliacetilè (CH) _x	$10^{-1} - 10^5$
Polipirrol PPy	$10^{-2} - 3 \times 10^2$
Politiofè PT	$2 \times 10^{-2} - 4 \times 10^2$
Poli(3-metiltiofè) PMT	$1 - 2 \times 10^3$
Poli(p-fenilè) PP	$10^{-3} - 10^4$
Poli(p-fenilè-vinilè) PPV	$10^{-1} - 10^4$
Polianilina PANI	$4 \times 10^{-4} - 4 \times 10^2$

67

L'estudi de macromolècules π -conjugades és, com hem comentat abans, intrínsecament interdisciplinari i requereix l'experiència de químics, físics i científics de materials. Molt sovint en les diferents subdisciplines del camp dels polímers conjugats s'usen terminologies diferents per parlar dels mateixos conceptes i fenòmens, especialment pel que fa als estats electrònics de les cadenes polimèriques neutres i carregades quan es produeix relaxació d'enllaços. En la taula següent es mostra el paral·lelisme existent entre la terminologia física utilitzada per descriure les excitacions

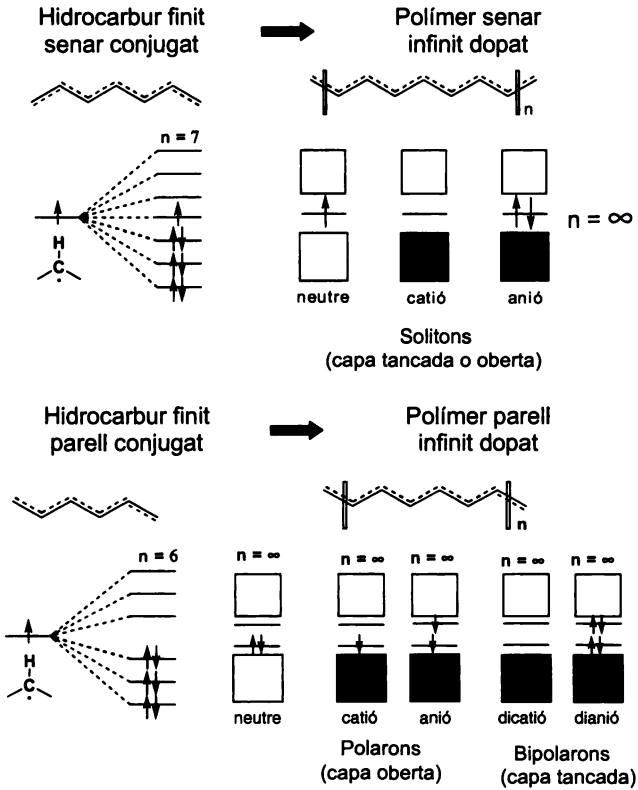
no lineals dels polímers conductors, que deriva del vocabulari desenvolupat en física d'estat sòlid per a l'estudi dels sistemes extensos, i la terminologia química que enfatitza la geometria molecular local en la proximitat de les càrregues i espins de la cadena polimèrica:

Terme físic	Terme químic
Estat no dopat	Estat neutre
ona d'ordre d'enllaç	alternança d'enllaços
ona de densitat de càrrega	diferència en la longitud d'enllaç
cel·la unitat	monòmer, fórmula unitat
funció de treball	potencial d'ionització
electronegativitat	afinitat electrònica
banda de valència	banda π , HOMO, nivell enllaçant
banda de conducció	banda π^* , LUMO, nivell no enllaçant
Dopatge	Química redox
típus p	oxidació
típus n	reducció
dopant típus p	agent oxidant
dopant típus n	agent reductor
Solitons	Estats no enllaçants
neutre	radical neutre
positiu	catió
negatiu	anió
Polarons	Ions radicals
polarons positius, vacants amb distorsió de xarxa associada	catió radical
polarons negatius, electró amb distorsió de xarxa associada	anió radical

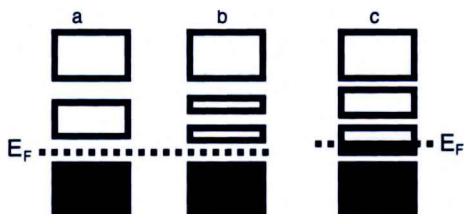
Bipolarons	ions
bipolarons positius	dications
bipolarons negatius	dianions

La formació de totes aquestes espècies carregades té implicacions electròniques i estructurals molt importants que són les responsables tant de les propietats elèctriques com d'altres d'òptiques i mecàniques que donen lloc a diferents aplicacions per als polímers conjugats.

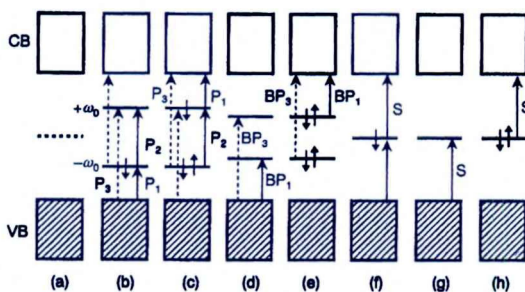
Per entendre el que passa quan s'injecta càrrega positiva o negativa (es dopa) en aquests compostos veurem l'exemple dels diferents nivells energètics i la seva ocupació per electrons dels polímers dopats que resulten de fer cadenes infinites partint d'hidrocarburs conjugats finits. Quan l'hidrocarbur conjugat és senar, té un orbital molecular semiocupat (SOMO), és a dir, té un electró deslocalitzat que en el polímer dóna lloc a solitons neutres radicalaris i que, en afegir o treure un electró, donen lloc a solitons carregats diamagnètics. Si partim d'un hidrocarbur finit conjugat parell no tenim cap electró desaparellat i aquest es produeix traient-ne o posant-hi un electró, amb la qual cosa es formen els polarons (de capa electrònica oberta) o els bipolarons (de capa electrònica tancada) en el cas d'afegir-hi o treure'n dos electrons. Totes aquestes espècies són les portadores de càrrega i ocupen orbitals situats molt a prop de les bandes de valència i conducció del polímer, tal com veiem en l'esquema següent:



Quan el dopatge és més intens, és a dir, quan es generen més portadors de càrrega, es formen bandes d'energia intermèdies entre la banda de valència i la banda de conducció, tal com es mostra en la figura següent:

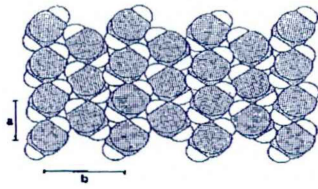


L'existència de totes aquestes espècies s'ha posat de manifest per les variacions que s'observen en l'espectre electrònic dels polímers en dopar-los, ja que tant el nombre de transicions òptiques possibles (en l'infraroig proper) com l'energia de cadascuna d'elles és diferent, tal com podem observar en l'esquema que segueix. Així mateix, moltes vibracions moleculars que no són actives en l'infraroig en els polímers neutres es tornen actives en presència de defectes carregats.

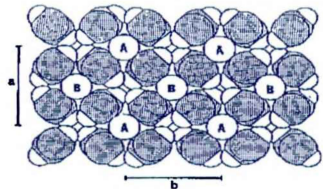


(a) neutre (b) positiu (c) polaró negatiu (d) bipolaró positiu
(e) bipolaró negatiu (f) solitó neutre (g) solitó positiu (h) solitó negatiu

A més de les implicacions electròniques, quan es dopa un polímer conjugat, hi ha un canvi estructural important pel fet que s'introdueix un contraïó per tal de mantenir la neutralitat del compost. Això provoca un augment del volum, que és més gran com més alt és el grau de dopatge. També es pot modular aquest canvi introduint-hi contraïons que tinguin geometries, càrregues i volums diferents. En la figura següent veiem l'exemple del poliacetilè, que manté el mateix tipus d'estructura quan és neutre o està dopat, però canvia considerablement els paràmetres de xarxa.



trans-poliacetilè neutre

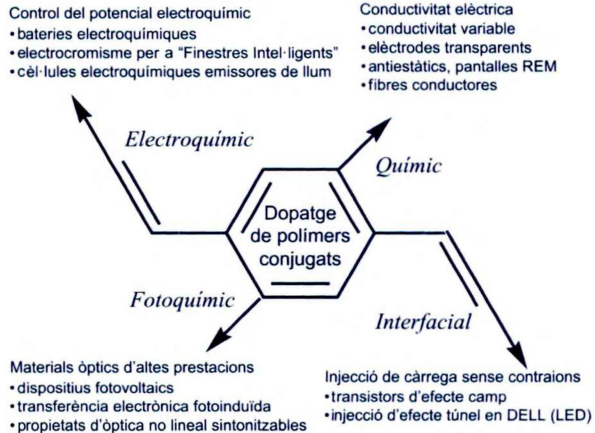


trans-poliacetilè dopat

S'han mesurat experimentalment els paràmetres de xarxa per al poliacetilè dopat amb metalls alcalins i s'ha observat que augmenten en augmentar el volum del metall, passant, per exemple, de ser $a' = 5,98$ quan el dopant és K^+ a ser $a' = 6,47$ quan és Cs^+ .

Veiem, doncs, que el dopatge dels polímers conjugats dóna lloc a una gran varietat d'importants i interessants fenòmens que defineixen el camp. Hi ha diferents maneres d'injectar càrrega (dopat) als polímers de forma reversible i cada forma pot donar lloc a aplicacions diferents perquè els canvis electrònics i estructurals que es produeixen són diferents. En la figura següent s'esquemmatitza el tipus de dopatge que resulta més adient per tal d'obtenir materials amb algunes aplicacions determinades:

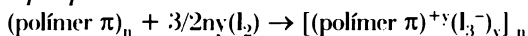
72



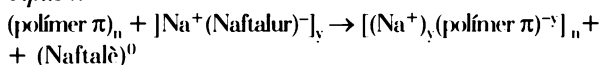
Dopatge químic

El descobriment inicial de la possibilitat de dopar els polímers conjugats es va fer, com ja hem comentat abans, amb la transferència de càrrega al poliacetilè mitjançant la química redox. En les equacions següents s'il·lustren els dos tipus de dopatge, oxidació (dopatge tipus p) i reducció (dopatge tipus n):

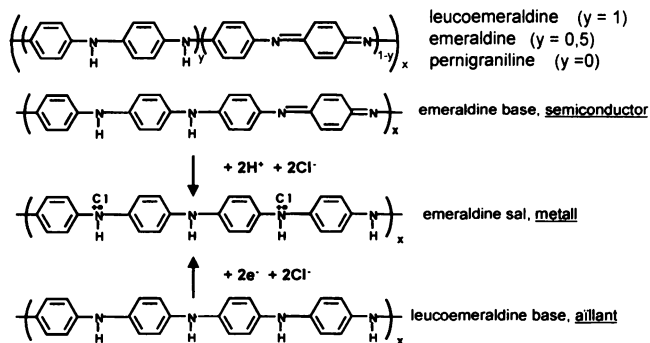
Tipus p



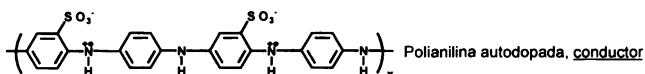
Tipus n



La polianilina també es pot dopar mitjançant un altre tipus de reacció química, ja que la protonació per reaccions àcid-base dona lloc a una reacció redox interna que converteix la base emeraldina, semiconductor, en la sal emeraldina, metàl·lica:



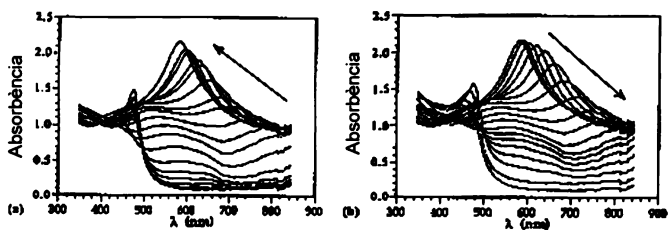
Així mateix es pot obtenir polianilina autodopada introduint un substituent aniónic com el sulfonat:



Dopatge electroquímic

En el dopatge electroquímic l'elèctrode aporta la càrrega del procés redox al polímer al mateix temps que els ions, que provenen de l'electròlit, es difonen en l'estructura del polímer. El nivell de dopatge ve determinat pel voltatge entre el polímer conductor i el contraelèctrode a l'equilibri electroquímic. D'aquesta manera es pot arribar a qualsevol nivell de dopatge homogeni ajustant la cel·la electroquímica a un voltatge aplicat fix i esperant el temps necessari per establir l'equilibri electroquímic en el sistema (el que ve indicat perquè el corrent que passa a través de la cel·la és zero). Amb aquest sistema s'obtenen dopatges intermedis molt reproduïbles i la qualitat del material obtingut és molt bona. En el cas, per exemple, del polipirrole s'obté, per polimerització electroquímica del pirrole, el polímer dopat com un film homogeni sobre l'elèctrode. El dopatge és reversible i es pot fer, d'una manera molt controlada, el que queda reflectit en la figura següent, en què es mostra l'evolució del seu espectre electrònic en funció del potencial d'oxidació (a) i de reducció (b) entre -900 i 400 mV:

74



Dopatge fotoquímic

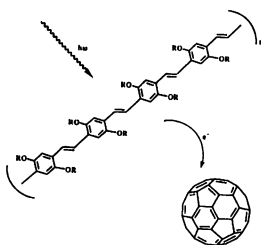
El polímer semiconductor s'oxida localment, i molt a prop es redueix, mitjançant fotoabsorció i separació de càrregues:



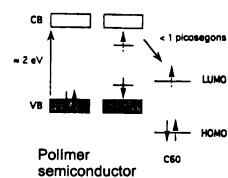
Després de la fotoexcitació des de l'estat fonamental fins a

l'estat excitat de més baixa energia amb la simetria adequada, la recombinació a l'estat fonamental pot ser radiativa o no radiativa, amb la qual cosa els polímers exhibeixen luminiscència (per exemple PPV i PPP) o no (per exemple PA i PT).

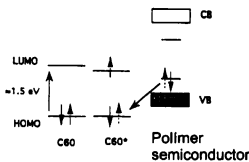
La separació de càrrega i la generació de portadors de càrrega lliures que segueixen la fotoexcitació s'incrementa significativament per transferència de càrrega fotoinduïda a un acceptor afegit al medi, com per exemple el C₆₀.



Transferència electrònica fotoinduïda

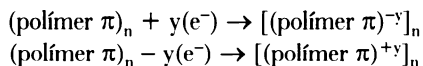


Transferència de vacants fotoinduïda



Dopatge per injecció de càrrega

Els electrons s'injecten en la banda π* (banda de conducció) o es treuen de la banda π (banda de valència) des de contactes metàl·lics.



En aquest cas, a diferència dels dopatges químics i electroquímics, no s'afegeix cap contraió al polímer.

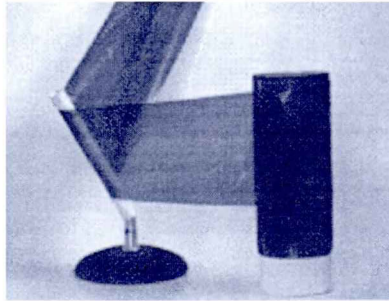
Atès que segons el tipus de dopatge s'introdueixen diferents modificacions en els polímers, segons el tipus de dopatge les aplicacions a què podrem accedir seran diferents.

D'acord amb el tipus de dopatge es poden definir tres tipus de materials:

1) *Polímers conjugats dopats permanentment*, que són els que es dopen químicament (redox o protònic). Les càrregues que apareixen en les cadenes polimèriques es compensen per inserció de contraions. Aquests materials són usats per a aplicacions que requereixen conductivitat electrònica no gaire alta i es poden obtenir en grans quantitats a baix preu, per la qual cosa són apropiats per a indústries grans interessades a comercialitzar tones de productes industrials. Entre les aplicacions que es comercialitzen hi ha:

- Pintures i teixits antiestàtics
- Pintures i teixits antiradiació electromagnètica
- Detectores de temperatures límit
- Dispositius semiconductors (circuits)
- Sensors de gasos
- Membranes de separació gas-líquid
- Termòmetres
- Plàstics conductors
- Tractaments anticorrosius
- Tractament antiestàtic de pel·lícules fotogràfiques

76

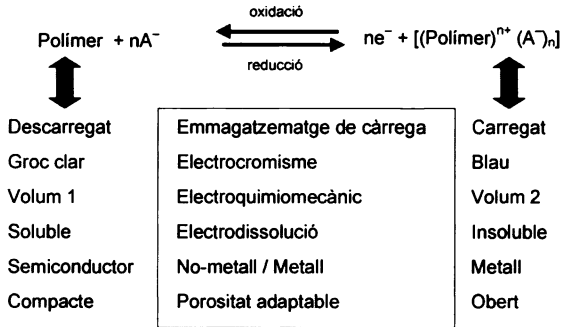


En la figura veiem un producte comercialitzat per la companyia Panipol Ltd., que és un plàstic conductor format per un

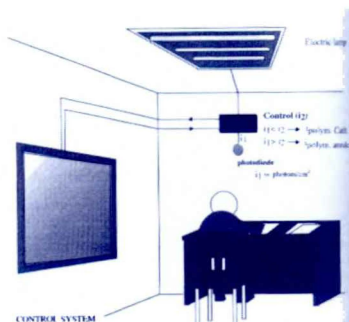
polímer conductor (PANI) que s'ha fet créixer dins una matriu polimèrica convencional que li dóna plasticitat i processabilitat.

Aquest és un dels sistemes que se segueixen per poder processar els polímers conductors, ja que una gran part són sòlids insolubles i infusibles, per la qual cosa no es poden processar per a la seva aplicació. També es fan servir altres procediments, com partir de monòmers amb substituents que donin solubilitat, formar copolímers amb un polímer no conductor processable com el poliestirè o fer servir com a dopants anions que siguin agents tensioactius.

2) *Polímers conjugats sotmesos a cicles redox*, és a dir, dopats i desdopats electroquímicament. En el quadre de l'esquema següent es resumeixen les propietats amb possibilitat d'aplicació derivades dels processos electroquímics:



Aquests són els polímers emprats per les bateries recarregables i les «finestres intel·ligents» que varien el color i l'absorbència del vidre en funció de la lluminositat exterior, tal com es mostra en aquesta figura:



Sistema de control

1. Monitor de corrent produït pel fotodíode.
2. Compara i_1 amb el nivell fixat i_2 .
3. Si $i_1 > i_2$, s'envia un corrent anòdic a la pel·lícula polimèrica i es para quan $i_1 = i_2$.
4. Si $i_1 < i_2$, s'envia un corrent catòdic a la pel·lícula polimèrica i es para quan $i_1 = i_2$.
5. Si no hi ha resposta al corrent catòdic, la làmpada elèctrica s'encén.

3) *Polímers conjugats sense dopar*, que tenen propietats semiconductoras i en què la injecció de càrrega es fa mitjançant fotoexcitació o per acció d'un camp elèctric.

Aquests materials requereixen un elevat grau de sofisticació i una tecnologia molt avançada, i de moment es produeixen només a escala de laboratori o bé per a petites empreses molt especialitzades. Tanmateix, tenen un gran futur per la seva aplicació en díodes emissors de llum, dispositius optoelectrònics, cèl·lules fotovoltaïques i transistors d'efecte camp.

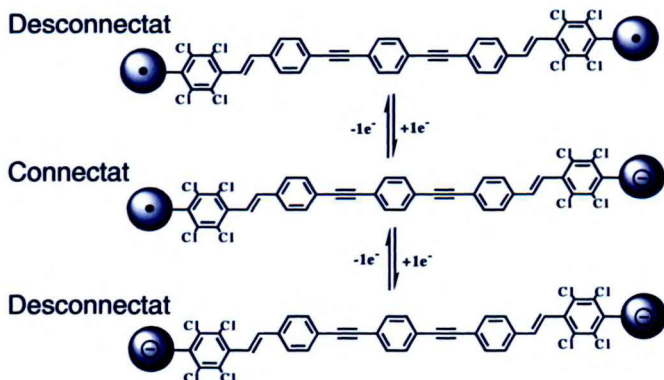
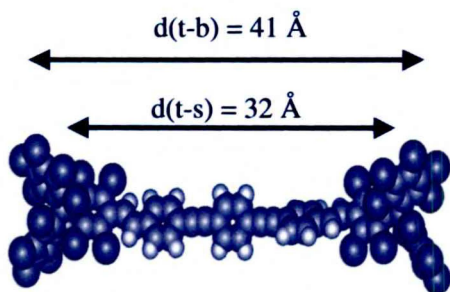
78

CONCLUSIONS I DESENVOLUPAMENT FUTUR

El descobriment dels polímers conductors ha donat lloc al desenvolupament de molts materials diferents que es poden fer servir en moltes aplicacions, ja sigui per millorar les prestacions dels materials que ja existien per a aquestes aplicacions o bé en noves aplicacions. Això es deu a les seves propietats característiques, ja que són materials semiconductors i metàl·lics solubles, conductors transparents, tenen l'energia de fermi sintonitzable, presenten electroluminiscència i termocroisme i es poden modificar mitjançant la síntesi orgànica.

A més, tot el coneixement generat en l'estudi dels diferents fenòmens que tenen lloc en els polímers conductors s'està aplicant actualment en el desenvolupament d'una nova àrea, l'electrònica

molecular, que pretén utilitzar una sola molècula per tal de fer les funcions que fan les macromolècules, és a dir, els polímers. Es pretén passar de l'electrònica basada en semiconductors inorgànics i polímers a l'electrònica basada en molècules simples per tal de minimitzar al màxim la mida dels dispositius. Fins ara existeixen alguns exemples de rectificadors moleculars, interruptors magnètics moleculars i fils moleculars, com és l'exemple que es mostra a continuació. Aquesta molècula es pot considerar un fil nanoscòpic, ja que quan el sistema està «on» l'electró es mou d'un costat a un altre. A més, electroquímicament es pot variar el seu estat, de manera que l'electró que es mou estigui només en una part de la molècula.



ELS LLOREJATS

Alan Heeger, nascut a Sioux City, Iowa (EUA) l'any 1936, es va doctorar a la Universitat de Califòrnia, Berkeley (EUA) al 1961 i va ser nomenat professor associat de la Universitat de Pennsilvània (EUA) l'any 1962, on va romandre fins l'any 1982. Des d'aquest any és professor de Física i Ciència de materials a la Universitat de Califòrnia, a Santa Barbara (EUA), i director de l'Institut de polímers i sòlids orgànics. L'any 1990 va fundar l'empresa UNIAx Corporation, on actualment és assessor científic i membre del consell d'administració.

Alan MacDiarmid va néixer l'any 1927 a Masterton (Nova Zelanda), on va créixer. Es va doctorar en Química l'any 1953 a la Universitat de Wisconsin (EUA) i l'any 1955 a la Universitat de Cambridge (Anglaterra). L'any 1956 va entrar com a professor associat a la Universitat de Pennsilvània (EUA), on és professor de Química des de l'any 1964.

Hideki Shirakawa, nascut a Tòquio (Japó) l'any 1936, va rebre el grau de Doctor a l'Institut de Tecnologia de Tòquio i l'any 1966 va entrar com a professor associat a l'Institut de Ciència de Materials de la Universitat de Tsukuba (Japó), on és professor de Química des de l'any 1982.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- CHIANG, C. K.; FISCHER, C. R.; PARK, Y. W.; HEEGER, A. J.; SHIRAKAWA, H.; LOUIS, E. J.; GAU, S. C.; MACDIARMID, A. G. (1977). «Conductivitat elèctrica en el poliacetilè dopat», *Physical Review Letters*, núm. 39, p. 1098.
- CHIANG, C. K.; DRUY, M. A.; GAU, S. C.; HEEGER, A. J.; LOUIS, E. J.; MACDIARMID, A. G.; PARK, Y. W.; SHIRAKAWA, H. (1978). *J. Am. Chem. Soc.*, núm. 100, p. 1013.
- FEAST, W. J.; TSIBOUKLIS, J.; POWER, K. L.; GRONENDAAL, L.; MEIJER, E. W. (1996). *Polymer*, núm. 37, p. 5017.
- ITO, T.; SHIRAKAWA, H.; IKEDA, S. (1974). «Simultaneous Polymerization and Formation of Polyacetylene Film on the Surface of Concentrated Soluble Ziegler-Type Catalyst Solution». *J. Polym. Sci.*, núm. 12, p. 11-20. *Polym. Chem. Ed.*
- KANATZIDIS, M. G. (1990). *Chem. Eng. News*, núm. 3, p. 36.
- ROTH, S. (1995). «One-Dimensional Metals», Weinheim VCH.
- (1993). Nobel Symposium in Chemistry: «Conjugated Polymers and Related Materials: The Interconnection of Chemical and Electronic Structure». A: SALANECK, W. R.; LUNDSTRÖM, I.; RÄNBY, B. Oxford: Oxford Sci.
- (1993). «Intrinsically Conducting Polymers: an emerging technology». ALDISSI, M. [cur.]. Kluwer Academic press. NATO ASI Series, Dordrecht.
- (1997). «Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers». H. S. NALWA [cur.]. Nova York: Wiley.
- (1999). «Advances in Synthetic Metals. Twenty years of Progress in Science and Technology». BERNIER, P.; LEFRANT, S.; BIDAN, G. [cur.]. Amsterdam: Elsevier.
- SHIRAKAWA, H.; LOUIS, E. J.; MACDIARMID, A. G.; CHIANG, C. K.; HEEGER, A. J. (1977). «Síntesi de polímers orgànics conductors de l'electricitat: derivats halogenats del poliacetilè (Cl)_x», *The Journal of Chemical Society; Chemical Communications*, p. 579.

Electroluminiscència en polímers conjugats

- BURROUGHES, J. H.; BRADLEY, D. D. C.; BROWN, A. R.; MARKS, R. N.; MACKAY, K.; FRIEND, R. H.; BURNS, P.L.; HOLMES, A. B. (1990). «Light Emitting diodes Based on Conjugated Polymers». *Nature*, núm. 347, p. 539.
- FRIEND, R. H.; GYMER, R. W.; HOLMES, A. B.; BURROUGHES, J. H.; MARKS, R. N.; TALJANI, C.; BRADLEY, D. D. C.; DOS SANTOS, D. A.; BREDAS, J. L. (1999). «Electroluminescence in Conjugated Polymers». M. Lögdlund and W.R. Salaneck. *Nature*, núm. 397, p. 121.
- GROENENDAAL, L. B.; JONAS, F.; FRETTAG, D.; PIELARTZIK, H.; REYNOLDS, J. R. (2000). «Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: Past, Present and Future». *Adv. Mater*, vol. 12, núm. 7, p. 481.
- BERGGREN, M.; INGANÄS, O.; GUSTAFSSON, G.; GUSTAFSSON-CARLBERG, J.C.; RASMUSSEN, J.; ANDERSSON, M. R.; HJERTBERG, T.; WENNERSTRÖM, O. (1994). «Light-Emitting Diodes with Variable Colours from Polymer Blends». *Nature*, núm. 372, p. 444.

Teoria de la transferència d'electrons en molècules

- LARSSON, S.; RODRÍGUEZ-MONGE, L. (1997). «Conductivity in Polyacetylene VI. Semiconductor-metal transition of alkali-doped polymer». *Int. J. Quant. Chem*, núm. 63, p. 655.
- MARCUS, R. A. (1956). «The theory of oxidation-reduction reactions involving electron transfer. I». *J. Chem. Phys.*, núm. 36, p. 966 i 979.
- WINOKUR, M.; MOON, Y. B.; HEEGER, A. J.; BARKER, J.; BOTT, D. C.; SHIRAKAWA, H. (1987). «X-ray scattering from sodium-doped polyacetylene: incommensurate-commensurate and order-disorder transformation». *Phys. Rev. Letters*, núm. 58, p. 2329.

Tecnologia electrònica

- DE LEEUW, D. (1999, març). «Plastic electronics». *Physics World*, núm. 31.
- GLEASON, R. E. (2000). «How far will circuits shrink?». *Science Spectra*, núm. 20, p. 32.

Empreses que comercialitzen polímers intrínsecament conductors

- Bayer AG: www.bayer.com (buscar Baytron P)
- Panipol Ltd: www.panipol.com
- Ormecon AG: www.ormecon.com
- The Agfa-Gevaert group, Specialty Foils & Components (SFC) business unit: www.sfc.agfa.com

Empreses que desenvolupen i comercialitzen díodes emissors de llum basats en polímers

- UNIAX Corporation: www.uniax.com
- Cambridge Display Techn.: www.cdtltd.co.uk
- Covion Organic Semiconductors GmbH: www.covion.com
- Philips: www.research.philips.com



**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2000
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE FÍSICA
CONCEDIT A
ZHORES I. ALFEROV,
HERBERT KROEMER I
JACK S. KILBY,
A CÀRREC DE
LLUÍS PRAT,
DE LA UNIVERSITAT
POLITÈCNICA DE
CATALUNYA**

En l'anunci de concessió dels premis Nobel de Física de l'any 2000,¹ comunicat el proppassat 10 d'octubre, es pot llegir:

The Royal Swedish Academy of Sciences has awarded the Nobel Prize in Physics
«for basic work on information and communication technology»

The prize is being awarded with one half jointly to
Zhores I. Alferov, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Peterburg, Russia, and
Herbert Kroemer, University of California at Santa Barbara, California, USA,
«for developing semiconductor heterostructures used in high-speed and opto-electronics»

and one half to
Jack S. Kilby, Texas Instruments, Dallas, Texas, USA,
«for his part in the invention of the integrated circuit».

Per presentar els premis Nobel d'enguany ens hem de referir, per tant, a les tecnologies de la informació i comunicacions, als circuits integrats, a les heteroestructures i la seva aplicació a dispositius d'alta velocitat, i a l'optoelectrònica.

LES TECNOLOGIES DE LA INFORMACIÓ I LES COMUNICACIONS. UNA VISIÓ PANORÀMICA

Les tecnologies de la informació i les comunicacions tenen molta influència en la vida quotidiana de la humanitat dels nostres dies. La televisió, la ràdio, el telèfon, els ordinadors, Internet... configuren un estil de vida radicalment diferent del que tenien els nostres avis, i ens seria molt difícil acostumar-nos a viure sense aquests avenços. Hi ha qui considera que la irrupció d'aquestes tecnologies és tant o més important que la Revolució Industrial o la invenció de la impremta. I tot això ha succeït en menys d'un segle, i continua creixent.

1. Adreça d'Internet: <http://www.Nobelprizes.com>.

Per situar l'aportació dels Premis Nobel del 2000 en el desenvolupament de les tecnologies de la informació i les comunicacions no se m'acudeix res millor que presentar una breu cronologia dels principals fets que han marcat la seva història. Es pot considerar que hi ha tres grans etapes: una gestació, que s'allarga fins a mitjan segle XIX; el naixement, que coincideix amb el del segle XX; una infantesa, que dura uns cinquanta anys i que és seguida d'una metamorfosi i d'un creixement espectacular que continua fins avui.

En la fase de gestació cal assenyalar alguns noms i dates importants:

- 1833: Babbage idea el precursor mecànic dels ordinadors actuals.
- 1837: Morse inventa la telegrafia elèctrica.
- 1847: Boole publica la seva àlgebra de proposicions lògiques.
- 1865: Maxwell presenta la teoria electromagnètica.
- 1876: Bell inventa el telèfon.
- 1877: Edison crea el fonògraf.
- 1896: Marconi transmet i detecta ones electromagnètiques a distància.
- 1897: Braun crea el tub de raigs catòdics.

Hom acostuma a dir que l'electrònica neix el 1904 quan Fleming inventa el díode de buit. La primera infantesa de l'electrònica arriba fins al 1947, any en què es descobreix el transistor bipolar. Durant aquesta etapa l'electrònica fa els primers passos íntimament lligada al desenvolupament de les comunicacions i amb el suport de la tecnologia de les vàlvules de buit. Es creen les grans teories i circuits que fan possible el desenvolupament de l'electrònica analògica. La teoria de la informació desenvolupada per Shannon i Kotelnikov i la de la realimentació per Black, Bode i Nyquist són d'aquesta època. També ho són la síntesi de circuits amplificadors i oscil·ladors, de l'amplificador operacional, i de circuits de comunicacions com el PLL. Neixen les grans aplicacions de l'e-

lectrònica, com la ràdio, la televisió i la computació. Comença, encara que molt tímidament, el desenvolupament de l'electrònica digital, utilitzant-se l'àlgebra de Boole per a l'anàlisi i disseny de circuits de commutació. Aquestes dates ens ajudaran a situar alguns esdeveniments:

- 1904: Fleming crea el díode de buit.
- 1906: L. de Forest inventa el tríode («l'audió») i l'aplica a la telefonia.
- 1914-1918: Primera Guerra Mundial: gran desenvolupament dels sistemes de ràdio portàtil.
- 1920: Primera emissora comercial de ràdio.
- 1923: Baird transmet la primera imatge de televisió.
- 1928: Primera demostració experimental de televisió.
- 1935: Apareix el radar.
- 1939: Primera televisió comercial als EUA.
- 1939-1945: Segona Guerra Mundial: gran desenvolupament del radar.
- 1945: Primer computador electrònic: l'ENIAC.

Les vàlvules de buit tenien dos inconvenients molt importants: un consum molt elevat, ja que calia escalfar, fins a posar vermell, un filament que emetia electrons, i una vida molt curta a causa del desgast que sofria aquest filament. Altres característiques desfavorables eren el seu pes, volum i fragilitat. És fàcil d'entendre, doncs, que hi hagués molt d'interès a trobar uns dispositius alternatius «d'estat sòlid» que permetessin superar aquestes limitacions. M. J. Kelly, director d'investigació als laboratoris Bell, va formar el 1945 un grup de recerca integrat per Shockley, Brattain i Bardeen, que el 23 de desembre de 1947 descobrí el transistor bipolar mentre intentava realitzar un transistor d'efecte de camp en un cristall de germani. Aquest descobriment va significar una refundació de l'electrònica, un nou naixement, una reconstrucció de tot el que s'havia fet fins aleshores. En qüestió de pocs anys van desaparèixer els antics equips construïts amb vàlvules de buit, que van ésser substituïts per nous cir-

cuits amb transistors. Algunes dates significatives d'aquesta època són:

- 1947: Es descobreix el transistor bipolar de germani.
- 1954: Primer transistor bipolar de silici.
- 1957: Kroemer publica la teoria del transistor bipolar d'heterojunció.
- 1958: Kilby inventa el primer circuit integrat (C. I.).
- 1960: Primer làser (de robí).
- 1962: Primer làser semiconductor (funcionant a la temperatura del nitrogen líquid).
- 1963: Alferov i Kroemer proposen el làser d'heteroestructura.
- 1969: El Departament de Defensa dels EUA crea ARPANET, precursora d'Internet.
- 1970: Primer díode làser de sortida contínua, a temperatura ambient (Alferov i Panish).
- 1971: Primer computador en un C. I. (Intel 4004).
- 1975: Tecnologia MBE per a heteroestructures. Neix el terme PC: Personal Computer.
- 1983: Primer sistema comercial de telefonia mòbil als EUA (AMPS).
- 1985: Microsoft crea el sistema operatiu Windows.
- 1992: Es crea la Internet Society.

59

Els primers transistors es van comercialitzar l'any 1951. Eren fets de germani, un semiconductor que té l'inconvenient de ser molt sensible a l'augment de temperatura. G. Teal, de Texas Instruments, va aconseguir realitzar transistors amb un altre semiconductor, el silici, que continua essent el material electrònic bàsic dels nostres dies. Un nou salt cap endavant, d'una importància crucial, fou la invenció del circuit integrat (C. I.) per part de J. Kilby, un dels guardonats amb el Premi Nobel d'aquest any. A partir del seu descobriment, l'electrònica va passar de «discreta», basada en la connexió de components individuals, a «integrada» basada en «xips», cristalls de silici que contenen tot el circuit.

Un altre fet important d'aquesta refundació de l'electrònica fou el naixement de la fotònica,² els circuits que tracten amb senyals òptics. Els díodes electroluminiscents, els làsers i les fibres òptiques són components essencials d'aquesta nova tecnologia. La fotònica va néixer l'any 1960 amb el làser de robí desenvolupat per Maiman. El desenvolupament, però, de «l'electrònica dels fotons» requeria nous materials semiconductors diferents del silici, els anomenats semiconductors de banda prohibida directa, i noves estructures combinant diferents semiconductors. Alferov i Kroemer van proposar el 1963 els làsers d'heterojunció que van permetre realitzar dispositius operatius per a comunicacions òptiques al començament dels anys setanta. Al mateix temps, les heteroestructures van permetre dissenyar uns dispositius més ràpids, els transistors d'heterojunció, que van empenyent cada cop més lluny la freqüència d'operació dels circuits electrònics, actualment per sobre dels 500 GHz. Encara que la idea bàsica va ser enunciatada per Shockley el 1950, Kroemer va presentar la teoria d'aquests transistors l'any 1957. Calgué esperar, però, fins a finals dels anys setanta perquè el desenvolupament de noves tecnologies fes possible la seva realització pràctica.

Durant aquesta segona joventut de l'electrònica l'accent ha passat dels circuits analògics al circuits digitals, i la computació ha experimentat un desenvolupament imparable. Amb el suport dels circuits integrats, els ordinadors han emprès una cursa de creixement en potència i velocitat que converteix en antiquats els equips que tenen una edat superior a cinc anys. La connexió d'aquests ordinadors en una xarxa planetària, Internet, obre les portes de la humanitat a una nova civilització global que està esborrant fronteres i muralles.

2. Adreça d'Internet: <http://www.vistlab.usyd.edu.au/photronics/revolution/index.html>.

En un article que va escriure el 1976,³ Jack Kilby (1923, Missouri, EUA) explica de manera detallada la seva invenció del circuit integrat. Graduat en enginyeria elèctrica a la Universitat d'Ill·linois el 1947, va començar a treballar a l'empresa Centralab en el disseny d'amplificadors per a sords, equip que per les seves característiques específiques requeria l'aplicació de tècniques de miniaturització. El 1952 Centralab va començar a fabricar transistors bipolars de germani per a aquests equips, però aquella era una època de canvi tecnològic molt accelerat, que exigia inversions importants en noves tecnologies (el germani ja començava a ser antiquat davant del silici) que superaven les capacitats de Centralab, i Kilby va decidir canviar d'empresa.

El maig de 1958 va ser contractat per Texas Instruments Incorporated, una gran empresa del sector electrònic, amb l'encàrrec de treballar en l'àrea de microminiaturització. A l'estiu es va quedar sol a la fàbrica perquè no tenia dret a fer vacances, ja que acabava de ser contractat. Sense possibilitat d'incidir en els processos de fabricació, va dedicar-se a dissenyar un circuit digital simple, un biestable, construït només amb semiconductors: transistors, resistències i condensadors fets amb silici que interconnectava amb fils metàl·lics. Pensava que d'aquesta manera una fàbrica de semiconductors podria reduir el cost dels equips que produïa en estalviar-se d'adquirir els altres components a l'exterior. Va muntar el circuit i el 28 d'agost d'aquell any va demostrar que funcionava.

El pas següent fou realitzar el circuit sobre un únic tros de semiconductor. Va aprofitar unes oblies de germani per realitzar un oscil·lador de desplaçament de fase, connectant amb fils d'or els components realitzats sobre un únic tros de germani. Va demostrar que funcionava el 12 de setembre de 1958. Acabava de néixer el primer circuit integrat. Com ell mateix deia, un circuit integrat

3. J. S. KILBY, (1976, juliol), «Invention of the integrated circuit», *IEEE trans. Electron Devices*, vol. 23, núm. 7.

molt bast, molt rudimentari, que s'assemblava molt poc als circuits integrats actuals. El 19 de setembre ampliava l'experiència construint de la mateixa forma tres biestables per demostrar que també es podien fer circuits digitals. Va sol·licitar la patent pel febrer de 1959 (figura 1) i presentà el nouinat al gran públic en el congrés de l'IRE del març següent amb el nom de «circuit sòlid».

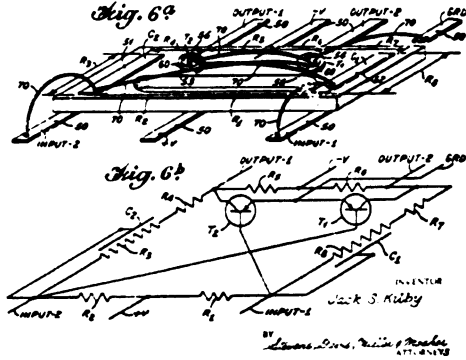


FIGURA 1. Patent de circuit integrat presentada per J. Kilby el 6 de febrer de 1959.

Com molt sovint passa en el camp de la ciència, gairebé alhora i d'una manera totalment independent, R. S. Noyce va realitzar també un circuit integrat.⁴ Sospito que si Noyce no hagués mort el 1990 hauria compartit el Nobel amb Kilby, igual que el comparteixen Kroemer i Alferov pel fet de ser coinventors de les heteroestructures. Aquesta coincidència d'invents o descobriments que són independents i quasi-simultanis té una freqüència massa elevada per ser producte de l'atzar. Jo ho comparo amb un gran roser a punt de florir. Una de les seves poncelles serà la primera d'obrir-se i tindrà un color i una aroma ben definits, però si aquesta no hagués florit ho hauria fet la del costat. Perquè qui floreix en realitat és el roser.

⁴ M. E. WOLF (1998), «The genesis of the integrated circuit», *IEEE Spectrum* (agost 1976).

Doncs bé, la societat d'aquella època reclamava la invenció del circuit integrat. En un congrés de components electrònics celebrat el 1952, l'anglès C. W. A. Dummer havia dit: «Amb l'adveniment del transistor i el treball en general amb semiconductors, sembla possible imaginar un equip electrònic realitzat en un bloc sòlid sense fils de connexió. Aquest bloc podria estar fet de capes de materials aïllants, conductors, rectificadors i amplificadors, essent definides les seves funcions elèctriques en base a tallar i connectar àrees de les diverses capes.» Era una intuïció visionària, ja que no existien «capes amplificadores» ni «rectificadores», però sembla talment la descripció dels actuals circuits integrats per algú que hagués pogut dirigir una mirada fugaç al futur.

La necessitat d'aquests circuits ja venia de lluny. Els avions B-29 usats en la Segona Guerra Mundial requerien un miler de vàlvules de buit i unes quantes desenes de milers de dispositius passius. Era evident que el futur estava limitat pel cost, volum i fiabilitat d'aquests equips. No era gens estrany que l'Exèrcit, la Marina i la Força Aèria nord-americans financessin molts projectes d'investigació que cercaven la miniaturització dels equips electrònics, apuntant alguns, fins i tot, cap al desenvolupament d'una «electrònica molecular».

Robert Noyce va graduar-se a la Universitat de Grinnell el 1949, i va cursar el doctorat en electrònica física a l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT). Després de treballar divuit mesos a l'empresa que havia creat W. Shockley, un dels descobridors del transistor, va crear el 1957, juntament amb uns altres set col·legues, l'empresa Fairchild Semiconductors. Més tard, el 1968, fundaria amb Gordon Moore l'empresa Intel, que des que va crear el primer microprocessador en un xip el 1971 no ha deixat d'encapçalar l'electrònica de computadors (els «Pentium» dels nostres ordinadors personals actuals porten la seva signatura).

Fairchild es dedicava a la fabricació de transistors de silici d'alta velocitat. El 1958, J. Hoerni, un dels socis fundadors, va desenvolupar el procés «planar», que permetia eliminar les inestabilitats superficials dels dispositius semiconductors d'aquella època cobrint la superfície del silici amb una capa d'òxid. Aprofitant aquesta

nova tecnologia, Noyce dibuixava el 23 de gener de 1959 en el seu quadern de laboratori un esquema en el qual es feien múltiples dispositius sobre una única peça de silici, i en què les interconnexions es feien mitjançant pistes metàl·liques dipositades sobre la capa aïllant superficial, com una part més del procés de fabricació. El 30 de juliol de 1959 presentava la patent del seu circuit integrat, que tenia totes les característiques dels circuits integrats actuals (figura 2). En aquest sentit anava més enllà que Kilby.

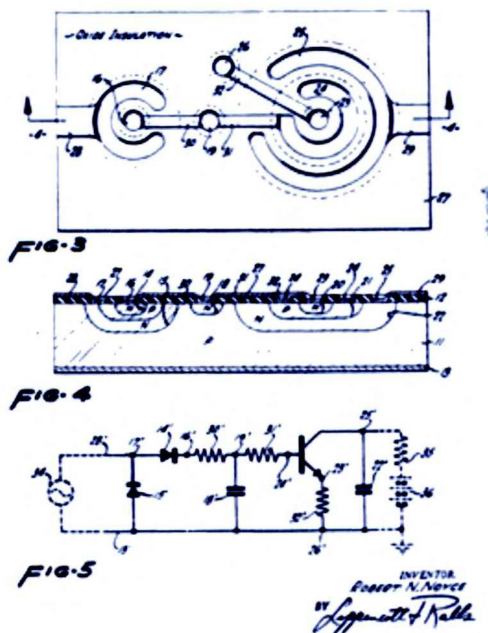


FIGURA 2. Patent de circuit integrat presentada per R. Noyce el 30 de juliol de 1959.

L'impacte que significaria la creixent complexitat que permetien els circuits integrats queda perfectament reflectit en una frase de Noyce del 1977, pocs anys després d'haver creat el primer microprocessador comercial integrat en un xip: «Un microordina-

dor d'avui té més capacitat de computació que el primer gran computador electrònic ENIAC. És vint vegades més ràpid, té una memòria més gran, és milers de vegades més fiable, consumeix la potència d'una bombeta en comptes de la d'una màquina de tren, ocupa un volum 30.000 vegades inferior, costa, a molt estirar, 10.000 vegades menys, i pot adquirir-se per correu o a la botiga de la cantonada». Vint-i-cinc anys després podríem dir quelcom similar dels computadores d'avui respecte a aquells als quals Noyce feia referència.

CIRCUITS INTEGRATS I ORDINADORS

Els circuits integrats han revolucionat tota l'electrònica, tant l'analògica com la digital. Malgrat això, el camp on la seva incidència ha tingut efectes més espectaculars ha estat el de la computació. Els circuits integrats han permès augmentar en ordres de magnitud la capacitat i velocitat de tractament de la informació dels ordinadors, permetent, en definitiva, que ja no sigui una quimera pensar que una xarxa planetària comunicarà tots els éssers humans mitjançant ordinadors personals.

Els circuits digitals s'han desenvolupat sobre la base dels transistors MOS, que són els dispositius que permeten una major densitat d'integració. En la figura 3 es mostra l'estructura d'aquest transistor, que consisteix essencialment en un interruptor, en el qual es tanca o s'obre la connexió entre els terminals de drenador i d'assortidor aplicant una tensió a un tercer terminal anomenat porta.

Per tenir una certa idea de la importància que ha tingut el C. I. en la revolució electrònica cal fer una breu incursió en la tecnologia dels circuits integrats de silici. En la figura 4 hi ha un esquema de les principals etapes que cal seguir per fabricar un xip. L'inici és la sílice (sorra), un dels materials més abundants de la natura. Mitjançant processos físics i químics s'aconsegueix silici de gran puresa: té un àtom d'impuresa per cada mil milions d'àtoms de silici, la mateixa proporció que un individu respecte a tota la població humana actual. En aquest material li manca, però, una

condició per ser silici electrònic: la perfecta ordenació espacial dels seus àtoms, és a dir, una estructura perfectament cristal·lina. Això s'aconsegueix, per exemple, amb el mètode Czokralski, que permet crear un cilindre monocristal·lí a partir del silici fos i una «llavor» cristal·lina. Aquest cilindre es talla posteriorment en discs, anomenats «oblies», que són la matèria primera per fer dispositius electrònics. El diàmetre de les oblies on es van fer els primers C. I. era d'uns cinc centímetres, però ha anat augmentant regularment des d'aleshores i avui és d'uns trenta centímetres.

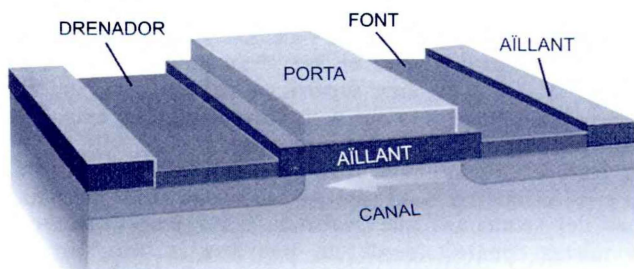


FIGURA 3. Estructura d'un transistor MOS. El condensador de porta format pel Metall - Òxid (aïllant) - Semiconductor dóna nom a aquest transistor.

Un circuit integrat consisteix en la interconnexió de regions N i P creades dins del cristall de silici mitjançant pistes metàl·liques dipositades sobre una capa d'òxid superficial. Les regions N són molt riques en electrons «lliures» i s'aconsegueixen inserint àtoms «donadors» al cristall de silici. Les regions P són deficitàries en electrons «lliures» i s'aconsegueixen afegint impureses «acceptores» al cristall. La inserció d'àtoms d'impuresa en el cristall de silici s'anomena «dopatge» i s'aconsegueix per mitjà de tècniques com la difusió d'estat sòlid o la implantació iònica. Per dopar una regió de l'oblia de partida s'aprofita una propietat molt important del diòxid de silici que consisteix a no deixar-se travessar pels àtoms d'impuresa. Així, es comença per cobrir tota l'oblia d'una capa su-

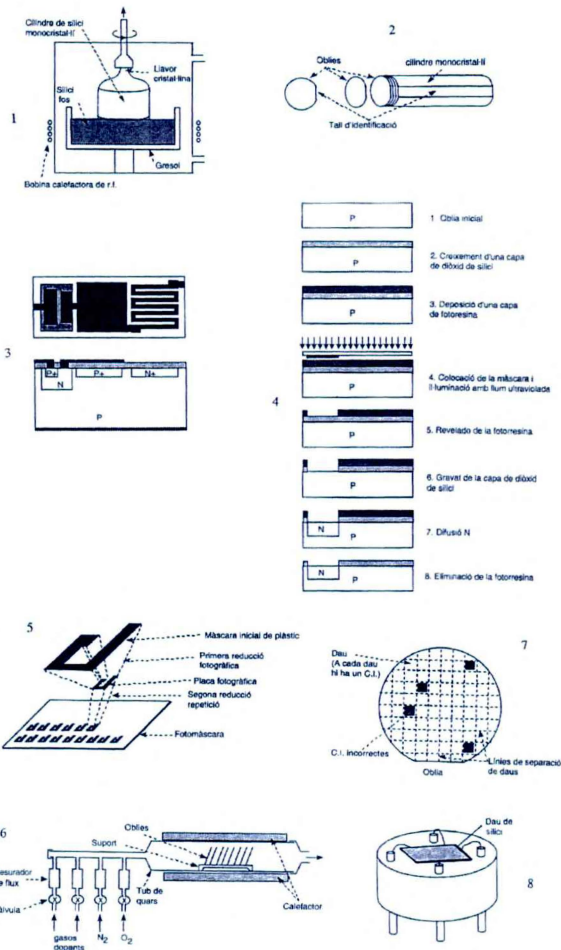


FIGURA 4. Tecnologia dels circuits integrats. 1) Obtenció del silici monocristal·lí pel mètode Czokralski. 2) Obtenció de les oblies. 3) Estructura d'un circuit integrat. 4) Processos tecnològics bàsics: oxidació, fotolitografia, gravat, inserció d'impureses. 5) Màscara per a fotolitografia. 6) Forn d'oxidació i difusió. 7) Obli i daus contenint cadascun un C. I. 8) Muntatge del dau en un encapsulat.

perficial de diòxid de silici i s'obren «finestres» en aquesta capa que deixen al descobert el silici de l'oblia. Les impureses penetren per aquestes finestres fins a una certa profunditat dins l'oblia de silici, i el silici protegit per la capa d'òxid no s'altera.

La creació de finestres en la capa d'òxid es realitza mitjançant la fotolitografia. Es diposita una capa de resina fotosensible sobre la capa d'òxid superficial, i s'aplica una màscara sobre aquesta resina. La màscara té àrees transparents i àrees opaques. En il·luminar l'oblia amb la màscara al damunt amb llum ultraviolada, els fotons d'aquesta radiació arriben a la resina a través de les àrees transparents de la màscara, cosa que provoca un canvi en les seves propietats, de manera que es dissol en un líquid de «revelatge» i desapareix, deixant al descobert la capa d'òxid. En canvi, però, la resina no il·luminada es manté intacta. A continuació se submergeix l'oblia en un àcid que ataca el diòxid de silici però no la resina fotosensible. D'aquesta manera s'obren finestres en la capa d'òxid.

98

Un circuit integrat ocupa una àrea molt petita sobre l'oblia, anomenada «dau». De fet, la superfície de l'oblia es divideix de forma regular en daus, fabricant-se simultàniament molts circuits integrats. El nombre de daus que es poden realitzar en una oblia augmenta en relació quadràtica al diàmetre d'aquesta. Si es té en compte que els processos tecnològics de fabricació es fan simultàniament sobre un nombre elevat d'oblies, s'entén que el cost de producció de circuits integrats disminueixi en augmentar el diàmetre de les oblies. Després es talla l'oblia, se separen els daus i es procedeix a l'encapsulació dels circuits que funcionen correctament. El xip que veiem en els equips electrònics conté en el seu interior el petit dau de silici, que és el que realitza les funcions electròniques.

L'altre element que incideix en la disminució del cost és la capacitat de fer els dispositius cada cop més petits. L'amplada d'una línia que es pot dibuixar de forma segura i repetitiva sobre el silici ha anat disminuint d'una manera uniforme i sostinguda des del primer circuit integrat. Això ha permès d'encabir dins una mateixa àrea un nombre creixent de transistors. El primer microprocessa-

dor en un xip, el 4004 d'Intel, tenia 2.300 transistors. Un «Pentium» actual en té més de deu milions. Això explica per què des de fa molts anys obtenim pel mateix preu ordinadors cada cop més potents que deixen antiquats els anteriors.

Gordon Moore, cofundador d'Intel junt amb Noyce, va adonar-se el 1965 que cada 18 o 24 mesos es doblava el nombre de components en el xip a causa de la reducció de l'amplada de línia. Per això va formular la seva famosa llei que preveia el manteniment d'aquesta característica en el futur. Gairebé quaranta anys després d'haver estat formulada es continua complint. En la figura 5 es mostra com ha anat augmentant el diàmetre de les oblies i el nombre de components en el xip (per microprocessadors, el nombre de components es dobla cada dos anys i, per memòries dinàmiques RAM, cada any i mig).

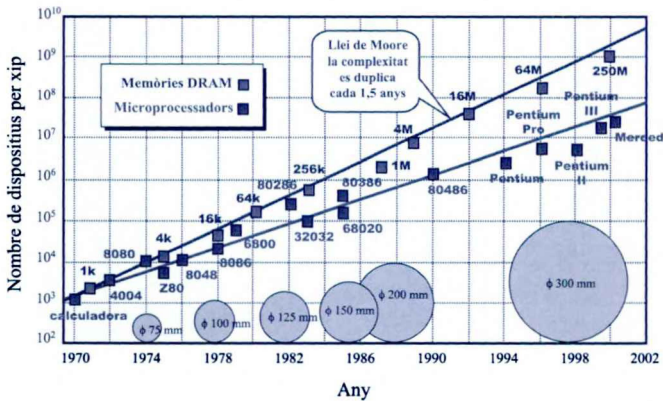


FIGURA 5. Evolució del nombre de transistors integrats en un xip (Llei de Moore).

A mesura que els dispositius es fan més petits, també es fan més ràpids. La velocitat d'un circuit digital ve limitada fonamentalment pel temps que es tarda a carregar i descarregar les capacitats paràsites. Aquestes capacitats són proporcionals a l'àrea, de manera que en reduir-se les dimensions dels dispositius es pot aug-

mentar la freqüència de treball del circuit. En la figura 6 es mostra l'evolució de l'amplada mínima de línia que permet la tecnologia i de la freqüència màxima dels circuits digitals.

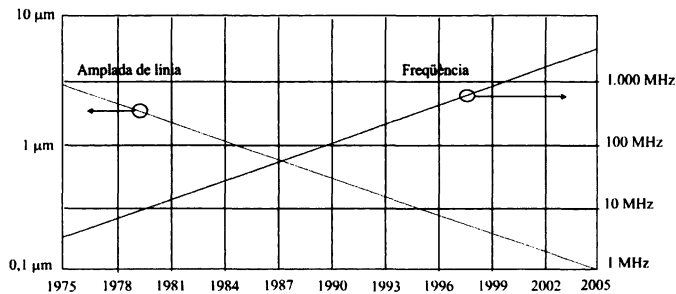


FIGURA 6. Evolució de l'amplada mínima de línia que permet la tecnologia i de la freqüència màxima de treball d'un microprocessador.

100

Les xifres representatives de l'estat actual de la tecnologia de circuits integrats digitals i les previsions de futur⁵ es mostren en la taula 1. Malgrat l'espectacularitat d'aquestes xifres, la llei de Moore continua marcant la pauta. Intel acaba d'anunciar —el passat 7 de novembre— que disposa, a nivell de laboratori, de la tecnologia de 0,13 µm, amb què preveu fabricar els xips previstos en la taula per a l'any 2002. D'aquí a cinc anys les CPU del nostres ordinadors tindran 200 milions de transistors i treballaran a una freqüència de 3,5 GHz. El cost d'un transistor s'haurà dividit per quatre. Els transistors MOS d'aquests xips tindran un òxid de porta d'una amplada d'uns 70 nanòmetres i un gruix d'una dotzena d'àngstroms.

5. International Technology Roadmap for Semiconductors:

<http://public.itrs.net/Files/1998Update/98Update.htm>.

ANY	1997	1999	2002	2005	2008
Amplada de línia (μm)	0,25	0,18	0,13	0,10	0,07
DRAM: bits/xip	267 M	1,07 G	4,29 G	17,2 G	68,7 G
μP : transistors/xip	11 M	21 M	76 M	200 M	520 M
Freqüència xip (MHz)	750	1250	2100	3500	6000
Grandària μP : (mm^2)	300	400	560	790	1120
Nombre de nivells de metal·lització	6	6-7	7	7-8	8-9
Diàmetre oblia (cm)	20	30	30	30	45
Tensió alimentació (V)	1,8-2,5	1,5-1,8	1,2-1,5	0,9-1,2	0,6-0,9
Cost transistor μP (10^{-8} \$)	3.000	1.735	580	255	110

TAULA 1. *Algunes característiques específiques de l'estat actual de la tecnologia de circuits integrats i previsions de futur. (International Technology Roadmap for semiconductors, 1998).*

101

La llei de Moore, però, té un final anunciat. No és possible anar doblant la densitat de components indefinidament cada any i mig⁶. I hi ha dues raons que ho impedeixen. Una de caràcter físic i una altra de caràcter econòmic. La primera és que el transistor MOS opera com un interruptor. Actualment la càrrega que s'ha de dipositar a la porta per fer-lo commutar és d'uns 1.000 electrons. En el supòsit de seguir el ritme de disminució marcat per la llei de Moore, aquesta càrrega seria, el 2020, d'una fracció d'electró, cosa que és físicament impossible.

L'altra limitació, de caràcter econòmic, és el cost del muntatge d'una fàbrica de circuits integrats. Aquest cost segueix fidelment la llei de Moore: es dobla cada tres anys, a causa de la modificació d'equips que exigeix la reducció de dimensions de l'amplada

6. J. BIRNBAUM; R. STANLEY WILLIAMS. «Physics and the Information Revolution». *Physics Today* online. <<http://physicstoday.org/vol-53/p38.html>>.

de línia i l'augment del diàmetre de les oblies. Per això es coneix amb el nom de segona llei de Moore (figura 7). Aquest augment de cost creix més ràpidament que el mercat de circuits integrats. Així, d'aquí a pocs anys construir una fàbrica de xips costarà més que el volum de tot el mercat electrònic mundial. Per tant, cal esperar que l'actual ritme de creixement exponencial es moderi i es tendeixi cap a una saturació.

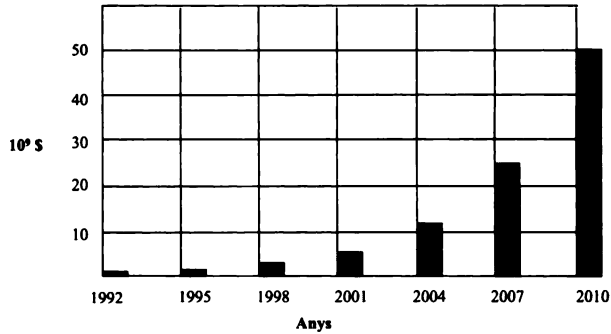


FIGURA 7. Evolució del cost d'instal·lació d'una planta de fabricació de circuits integrats.

HERBERT KROEMER I ZHOLES ALFEROV: LES HETEROESTRUCTURES

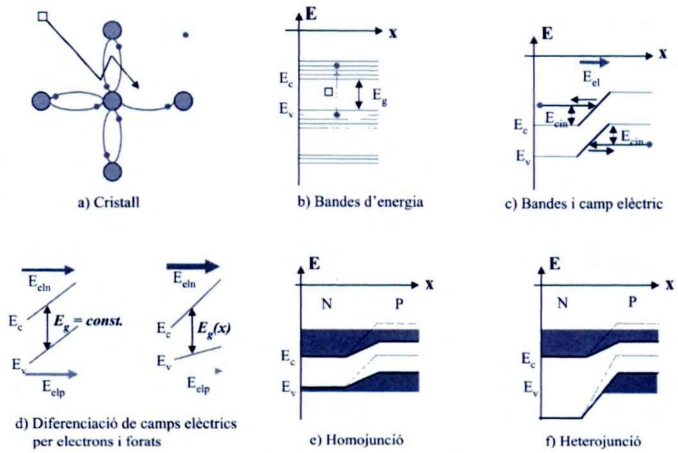
La segona meitat del Premi Nobel és compartida per aquests dos científics per la seva aportació al desenvolupament dels dispositius basats en heteroestructures que ha permès crear l'electrònica d'alta velocitat i la fotònica. Com en el cas de Kilby i Noyce, les seves propostes es presenten simultàniament i de forma independent.

El silici no és l'únic semiconductor emprat en l'electrònica. Abans va ser-ho el germani, i més tard l'arsenur de gal·li (GaAs) i molts altres. Hom anomena heteroestructura el cristall realitzat amb diferents semiconductors. Per fer dispositius basats en heteroestructures és important que no es trenqui l'ordenació cristal·lina

global en passar d'un material a un altre. Aquest requisit va exigir disposar d'unes tecnologies adequades per fer possibles unes estructures que van ser proposades molts anys abans que es poguessin realitzar. Shockley les havia suggerit en una patent de 1948, H. Kroemer va presentar la teoria dels transistors bipolars d'heterojunció l'any 1957 i va suggerir aquestes estructures per fer làsers el 1963. Al mateix temps i de manera independent, Alferov patentava aquesta estructura a l'URSS. Malgrat això, els primers làsers d'heteroestructura no van arribar fins al 1970, amb l'ús d'una tecnologia LPE (epitàxia de fase líquida), i la seva irrupció massiva no arribà fins als anys vuitanta, després que es posessin a punt les tecnologies MBE (Molecular Beam Epitaxy) i MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition), que van permetre fer créixer capes cristal·lines sobre un substrat, controlant el creixement de cada capa d'àtoms.

Per entendre les propietats de les heteroestructures cal tenir una certa noció del diagrama de bandes d'energia d'un semiconductor. Aquest diagrama (figura 8) descriu l'energia total que tenen o poden tenir els electrons en cada punt del semiconductor. De manera semblant al que succeeix en l'àtom, els electrons en el semiconductor només poden tenir unes energies, uns «nivells d'energia», determinats. Hi ha uns nivells d'energia especialment importants en el comportament elèctric del semiconductor: els que tenen les càrregues mòbils que «porten» el corrent. És a dir, els electrons lliures, que són aquells que han trencat la seva pertinença a un enllaç covalent, i els electrons de valència, quan hi ha enllaços covalents trencats. Doncs bé, les energies que poden tenir els electrons lliures estan agrupades en un interval anomenat *banda de conducció*, en el qual hi ha una gran densitat de nivells permesos, fent l'efecte de continuïtat de nivells. El mínim d'energia d'aquesta banda s'anomena E_c . Les energies que poden tenir els electrons que formen part dels enllaços covalents s'agrupen en la banda de valència, essent E_v el seu valor màxim. L'interval entre E_c i E_v s'anomena banda prohibida, o *gap* en anglès, i és un dels paràmetres més significatius del semiconductor. Representa el mínim d'energia que cal donar a un electró

d'un enllaç covalent per deslligar-lo. En el silici val 1,12 eV i en el GaAs, 1,43 eV.



104

FIGURA 8. Bandes d'energia d'un semiconductor. a) Estructura cristal·lina mostrant els enllaços covalents. b) Bandes d'energia mostrant la transició d'un electró en trencar l'enllaç. c) Dobleçament de les bandes per efecte d'un camp elèctric i confinament dels portadors. d) Diferenciació de camps elèctrics per electrons i forats en les heteroestructures. e) Diagrama de bandes en un díode d'homojunció i d'heterojunció (f).

El diagrama de bandes d'energia permet descriure el moviment dels portadors a l'interior del cristall i la seva interacció amb els camps elèctrics presents. Un electró lliure d'energia E_c té una energia cinètica de valor $(E_c - E_c)$. Quan aquest electró es desplaça d'esquerra a dreta, tal com mostra la figura 8, i entra en una regió en la qual hi ha present un camp elèctric de sentit esquerra-dreta, l'electró és frenat pel camp i perd velocitat i, per tant, energia cinètica. Aquesta situació es representa en el diagrama de bandes fent que el pendent de la corba E_c sigui proporcional al camp elèctric present en aquest punt. Quan l'electró «toca» el nivell E_c , la seva energia cinètica és zero, i per tant la seva velocitat s'ha anul·lat per l'acció de frenada del camp elèctric. A partir d'aquest

moment el camp elèctric empeny l'electró cap a l'esquerra. Es diu que la barrera d'energia confina l'electró a la regió on E_c és més gran que E_v .

Quan hi ha un enllaç covalent trencat, un electró de valència d'un enllaç proper salta cap a l'enllaç trencat per refer-lo, de manera que deixa darrere seu, com a resultat d'aquest salt, un enllaç covalent trencat. Tot succeeix com si qui es moguéssos fos l'enllaç covalent trencat, que equival a una càrrega positiva que s'anomena «forat». L'energia d'un forat és la del nivell d'energia buit que queda a la banda de valència quan un electró trenca l'enllaç i salta a la banda de conducció. Un forat d'energia E_h té una energia cinètica ($E_v - E_h$). Quan el forat es mou dintre el semiconductor i «toca» el nivell E_v , la seva energia cinètica s'anul·la. Es diu que el forat està confinat a la regió on E_v és més gran que E_h .

El pendent de la corba E_c representa, per tant, el camp elèctric efectiu que actua sobre els electrons, mentre que el pendent de E_v representa el camp elèctric efectiu que actua sobre els forats. Una heterojunció permet que el camp elèctric efectiu que actua sobre els electrons sigui diferent del que actua sobre els forats. Aquest nou grau de llibertat que permet l'heterojunció s'acostuma a anomenar «enginyeria del *bandgap*».

En la figura 8 també es representen les bandes d'energia d'un díode d'homojunció i un altre d'heterojunció. En el segon cas, el semiconductor de l'esquerra té un *gap* més gran que el de la dreta. A conseqüència d'aquesta diferència, el doblegament de E_c és més petit que el de E_v , i, per tant, el camp elèctric que actua sobre els electrons és més petit que el que actua sobre els forats. Quan la tensió de polarització fa abaixar la barrera d'energia, circulen electrons de N a P i forats de P a N en l'homojunció, mentre que en l'heterojunció els forats queden confinats a la regió P pel fet que la barrera per a aquests portadors és molt més alta que la que han de superar els electrons per anar de N a P. Noteu que quan la polarització canvia de signe no circula corrent, ja que ni els electrons ni els forats no poden superar les barreres d'energia.

Herbert Kroemer (1928, Alemanya) va defensar la seva tesi doctoral el 1952 a la universitat alemanya de Göttingen sobre efec-

tes d'electrons calents (*hot-electrons*) en el transistor bipolar que s'acabava de descobrir. Després de treballar en diversos laboratoris de recerca alemanys i americans, es dedica des de 1976 a la tecnologia de semiconductors compostos a la Universitat de Califòrnia, a Santa Clara. El 1957 va publicar un article sobre la teoria de funcionament dels transistors d'emissor de *gap* ample, i el 1963 va proposar el concepte de làser de doble heteroestructura sense el qual no hauria estat possible el desenvolupament de la fotònica. La seva investigació actual gira entorn de la creació d'estructures híbrides superconductors-semiconductors basats en pous quàntics de InAs-AlAs i en la recerca d'oscil·ladors de terahertz basats en superxarxes.

Zhores I. Alferov (1930, Bielorússia) va graduar-se en electrònica a l'Institut Electrotècnic de Leningrad el 1952. L'any següent va ingressar a l'A. F. Ioffe Physico-Technical Institut de Sant Petersburg, on ha desenvolupat la seva tasca científica fins ara. Va anar accedint de manera regular a nivells superiors de coneixement i responsabilitat, fins a doctorar-se en Física i Matemàtiques l'any 1970. Des de 1962 treballa a l'àrea d'heteroestructures basades en semiconductors compostos, destacant aportacions tan importants com la patent a l'URRS de l'estructura làser de doble heterojunció el 1963, al mateix temps que Kroemer, i el desenvolupament el 1970 del primer làser de sortida contínua a temperatura ambient basat en aquesta estructura i realitzat amb tecnologia LPE, al mateix temps que Panish en els laboratoris Bell (EUA). Actualment treballa en el desenvolupament de làsers basats en punts quàntics («quantum dots» en anglès).

HETEROESTRUCTURES I TRANSISTORS D'ALTA VELOCITAT

En la figura 9 es presenta l'espectre de freqüències per a comunicacions d'alta velocitat previstes a Europa per a l'any 2008. Aquestes aplicacions ja comencen a tenir un gran impacte en la nostra vida quotidiana: la televisió d'alta definició, la distribució de vídeo a la carta, les xarxes d'ordinadors connectades via ràdio,

la telemàtica del transport per carretera, radars anticòlisió en els automòbils, etc. Com es veu en la figura, les freqüències que s'hi usen superen les desenes de GHz i exigeixen dispositius i circuits d'alta velocitat.

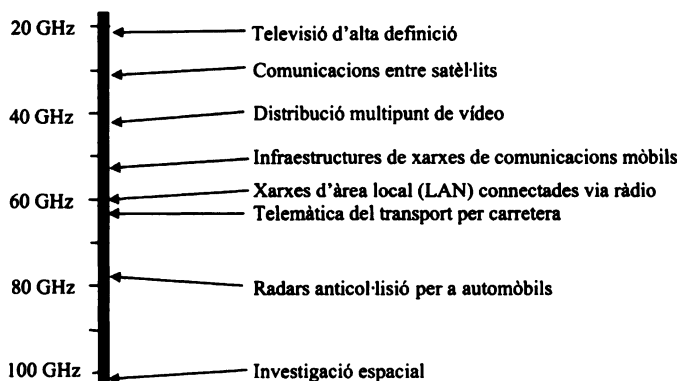


FIGURA 9. Espectre de freqüències per a aplicacions de comunicacions d'alta velocitat previstes a Europa per a l'any 2008.

Els dos dispositius electrònics que encapçalen l'electrònica d'alta velocitat es basen en heteroestructures. Un d'ells és l'HBT (Heterojunction Bipolar Transistor). L'altre és l'HEMT (High Electron Mobility Transistor), també conegut amb el nom de MODFET (MODulation Doped Field Effect Transistor). Per fer aquests dispositius s'acostumen a usar semiconductors formats per la combinació d'elements dels grups III i V de la taula periòdica. Els que han tingut un desenvolupament més important són els basats en el sistema AlGaAs/GaAs, però comencen a tenir un protagonisme creixent i una potencialitat de futur més gran els basats en InGaAs/InP. Cal assenyalar, però, que també es fan transistors d'heteroestructura basats en el sistema Si/SiGe, que intenta aprofitar la maduresa de la tecnologia del silici i les potencialitats de les heterojuncions. En la figura 10 es representen els valors del *gap* de diversos semiconductors i la seva constant de xarxa cristal·lina.

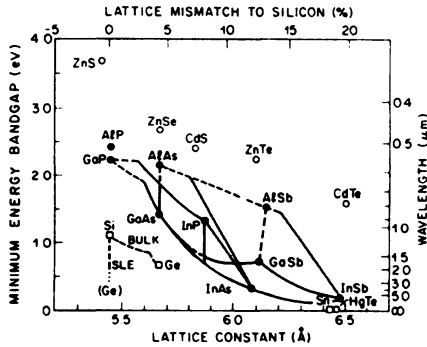


FIGURA 10. Semiconductors per heteroestructures: han de tenir la mateixa constant de xarxa cristal·lina.

108

Encara que l'HBT ja havia estat suggerit per Shockley en una patent de 1948, el pare efectiu d'aquest dispositiu fou Kroemer, que va presentar la seva teoria d'operació el 1957⁷ i un estudi de les seves potencialitats el 1982,⁸ just quan s'havien desenvolupat les tecnologies que el feien possible. La figura 11 mostra l'estructura i el diagrama de bandes d'aquest dispositiu. Tal com es pot observar, el *gap* de l'emissor és més gran que el de base i col·lector. L'avantatge fonamental d'aquest dispositiu és que la barriera que han de superar els forats per anar de la base a l'emissor és molt més gran que la dels electrons per anar de l'emissor a la base. Això permet no dependre de la relació de dopatges entre emissor i base per aconseguir que el corrent d'electrons d'emissor a base sigui molt més gran que el corrent de forats de base a emissor, que és la relació que determina el guany de corrent del transistor. A diferència dels transistors fets d'un sol semiconductor, els dopatges d'emissor i base d'un HBT es dissenyen per minimitzar les re-

7. H. KROEMER, (1957). «Theory of a Wide-Gap Emitter for Transistors», *Proc. of the IRE*, p. 1535.

8. H. KROEMER, (1982, gener). «Heterostructure Bipolar Transistors and Integrated Circuits», *Proc. of the IEEE*, vol. 70, núm. 1.

sistències i capacitats que determinen la màxima freqüència del senyal que pot amplificar el transistor.

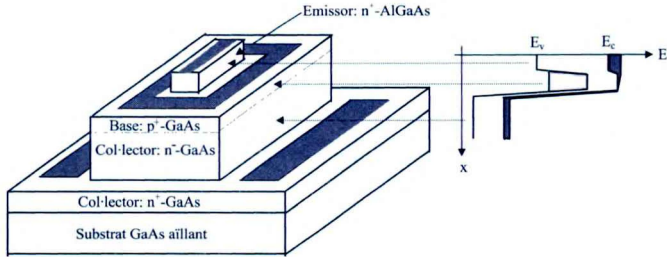


FIGURA 11. Estructura i diagrama de bandes d'energia d'un HBT. Noteu que el gap de l'emissor és més gran que el de base i col·lector.

Per la seva banda, l'HEMT és un transistor d'efecte de camp, similar al MOS, però que aprofita una propietat que presenta la seva heteroestructura: el transvasament d'electrons d'una regió molt dopada i de *gap* ample a una regió poc dopada i de *gap* petit. En la figura 12 es presenta l'estructura i diagrama de bandes d'aquest transistor. El corrent que flueix entre el drenador i el sortidor circula a través d'un canal anomenat 2DEG, de manera que es pot controlar la quantitat d'electrons d'aquest canal a través de

109

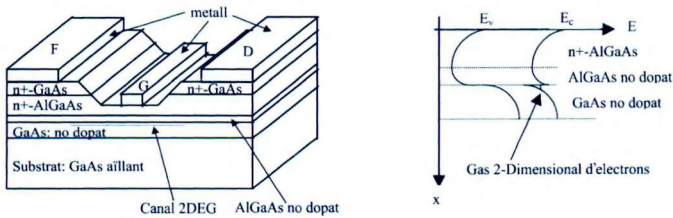


FIGURA 12. Estructura i diagrama de bandes d'energia d'un HEMT. El canal conductor està constituït pels electrons atrapats a l'escletxa del nivell E_c en el material de *gap* més petit.

la tensió aplicada a la porta G. En aquesta heterojunció es forma una esclatxa molt estreta a la part poc dopada de GaAs. Aquesta esclatxa s'omple d'electrons procedents de la capa molt dopada de AlGaAs i, com que és molt estreta, presenta fenòmens de quantificació d'energia típics d'un pou quàntic (el nom 2DEG fa referència a aquest fet: «2-Dimensional Electron Gas»). Els electrons d'aquest pou tenen una alta mobilitat.

Hi ha una pugna entre els HBT i els HEMT per encapçalar l'electrònica d'alta velocitat. En la figura 13 es presenta l'evolució de la freqüència màxima que poden amplificar aquests transistors. En una primera fase la cursa era dominada pels HEMT, però el resultat final és cada cop més incert. Actualment, tant els uns com els altres poden amplificar freqüències superiors a 500 GHz. Sembla, però, que els HBT de InGaAs tenen més potencialitat de futur que els altres, tant pel que fa a la freqüència màxima que poden amplificar com per la potència que poden controlar i són, per tant, els dispositius del futur per a comunicacions sense fils i telecomunicacions espacials.

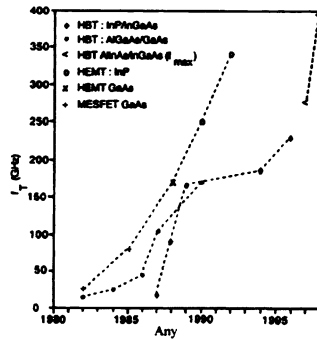


FIGURA 13. Evolució de la màxima freqüència d'amplificació en els últims anys.

HETEROESTRUCTURES I DÍODES LÀSER

El làser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es basa en l'emissió estimulada de radiació electromagnètica des-

coberta a nivell teòric per Einstein el 1917. Calgué esperar fins al 1960 per veure la confirmació experimental de la teoria de l'emissió estimulada mitjançant el làser de robí creat per Maiman, i fins al 1970 per tenir làsers de semiconductor que donessin un feix de llum continu i a temperatura ambient. La llum del làser és monocromàtica, direccional i coherent, propietats que la diferencien d'altres fonts de llum i la fan única.

En la figura 14 es presenten alguns camps d'activitat on els làsers tenen una presència significativa. La cirurgia ocular en el camp de la medicina, la lectura del codi de barres en el comerç, els discs compactes en la música i en la informàtica, la fotònica en les comunicacions òptiques, les impressores i l'holografia en les arts gràfiques, els sensors de fibres òptiques en el camp de l'electrònica, així com la seva utilització en els camps de la meteorologia i de la tecnologia dels materials, són algunes de les aplicacions més recents i conegudes per tothom.

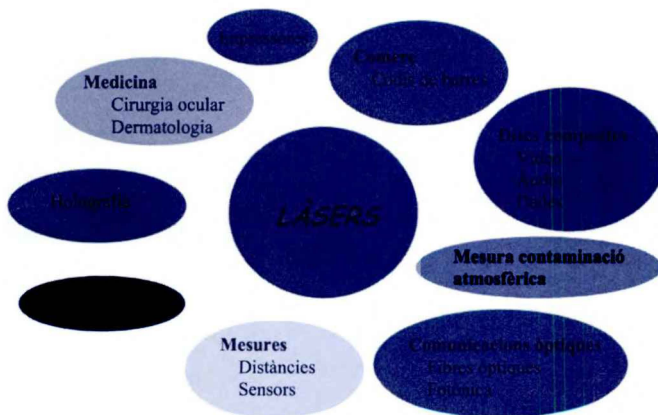


FIGURA 14. Alguns camps d'aplicació dels làsers.

La llum que emeten alguns semiconductors neix de la recombinació de portadors. Un electró ha d'absorbir energia, un «quantum», per trencar el seu lligam d'un enllaç covalent. Això li

permet saltar de la banda de valència a la de conducció. Doncs bé, quan un electró lliure passa a prop d'un enllaç covalent trencat pot ser capturat i reconstruir aquest enllaç. Ara bé, per fer-ho, cal que es desempallegui de l'excés d'energia que va adquirir en alliberar-se. Si el semiconductor té una estructura de bandes anomenada de «*gap* directe», l'energia d'excés la desprèn en forma de fotó; en cas contrari, en forma de calor. El GaAs és un material de *gap* directe, mentre que el silici és de *gap* indirecte. Aquest és el motiu pel qual no es fan làsers de silici.

L'emissió estimulada consisteix en el fet que un fotó d'energia adequada pot «estimular» la recombinació d'un electró. El fotó estimulador ha de tenir la mateixa energia que la del fotó emès en la recombinació. Aleshores el fotó estimulador i el fotó lliurat en la recombinació viatgen en fase, en coherència. En la figura 15 es representa aquest concepte. Suposem que E_0 i E_1 són dos nivells d'energia que poden tenir un electró. Evidentment, els fotons emesos en passar l'electró de E_1 a E_0 poden ser reabsorbits per electrons que estiguin en el nivell E_0 . També pot donar-se la recombinació «espontània» d'un electró des de E_1 fins a E_0 . Perquè l'emissió es-

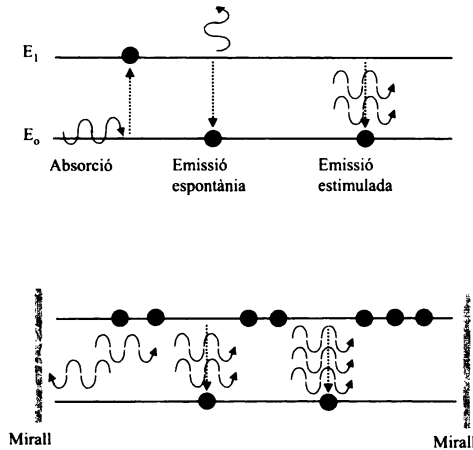


FIGURA 15. Emissió estimulada i caritat òptica ressonant en un làser.

timulada domini sobre l'absorció i l'emissió espontània, s'han de complir dues condicions: que hi hagi «inversió» de població, cosa que vol dir que hi hagi més electrons en el nivell E_1 que en el E_0 , i que hi hagi una cavitat òptica ressonant que faci créixer el feix d'electrons coherents a còpia d'anar-los reflectint entre dos miralls perpendiculars a la regió activa del làser. A cada passada a través de la capa activa es van afegint al feix coherent nous fotons generats per emissió estimulada.

Aconseguir la inversió de població en un díode làser fou un repte difícil de superar. La inversió de població en un semiconductor consisteix a tenir en un mateix punt molts electrons lliures i molts forats. En els primers làsers això s'aconseguia, molt difícilment, fent circular uns corrents molt intensos en un díode construït amb regions molt dopades. Calia refrigerar el díode a la temperatura del nitrogen líquid i només s'aconseguien polsos de llum de durada molt curta. El problema fou superat gràcies a l'ús d'heteroestructures. En la figura 16 es mostra l'esquema proposat per Kroemer el 1963.⁹ Com es pot observar, consisteix en una regió central de *gap* estret situada enmig de dues regions de *gap* ample.

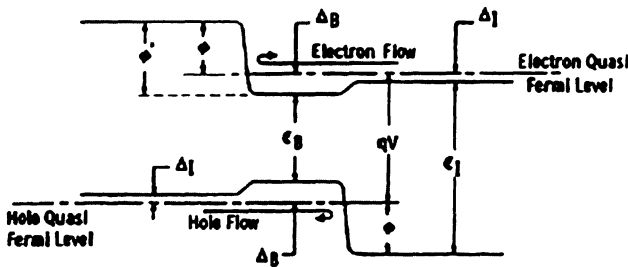


FIGURA 16. Diagrama de bandes d'un làser de doble heterojunció proposat per Kroemer el 1963.

9. H. KROEMER, (1963). «A proposed class of heterojunction injection lasers». *Proc. of the IEEE.*, p. 1783.

La regió de la dreta té un dopatge de tipus P i injecta forats a la regió central. La barrera de potencial que presenta el semiconductor de la dreta els confina a l'esquerra de la barrera. Quelcom semblant succeeix als electrons que injecta el semiconductor de tipus N de la dreta cap a la regió central. A conseqüència d'aquests fenòmens, la regió del mig del *gap* estret té molta riquesa simultània d'electrons i de forats, aconseguint la inversió de població sense necessitat de fer circular uns corrents enormes. La cavitat òptica ressonant acostuma a construir-se polint les parets del semiconductor perpendiculars a la capa activa. El feix de llum surt pel fet que una d'aquestes parets transmet parcialment la llum (figura 17).

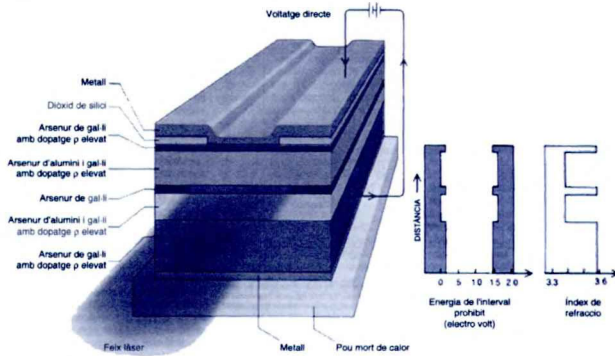


FIGURA 17. Estructura d'un díode làser de doble heterojunció.

En la figura 18 es mostra com ha anat evolucionant al llarg del temps el corrent mínim que cal fer circular en el díode per aconseguir un feix làser.¹⁰ Tal com es pot veure, aquest corrent s'ha reduït en més de tres ordres de magnitud. També s'indiquen en aquesta figura les línies de progrés que han seguit els làsers en els anys posteriors per aconseguir aquesta disminució: la utilització de pous quàntics («quantum wells») i la de superxarxes de curt període SPS («Short-Period Superlattices»). En la taula 2 es mostren les

10. Zh. I. ALFEROV, (1998, gener), «The history and future of semiconductor heterostructures», *Semiconductors*, núm. 32, p. 1.

característiques d'un làser modern basat en aquestes estructures. Crida l'atenció el seu corrent llindar de tan sols 1 mA, la seva eficiència de potència del 50 %, i també el seu baix cost.

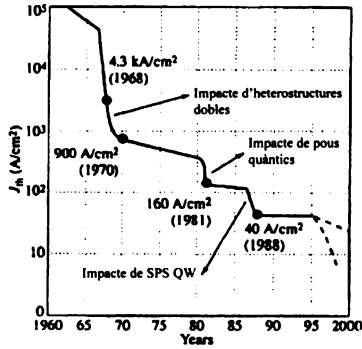


FIGURA 18. Evolució del corrent llindar dels díodes làser i causes de la seva reducció.

Estructura	Pous quàntics (QW)
Nombre de capes	200
Gruix de cada capa	60 – 900 Å
Cavitat òptica ressonant	Perpendicular a la capa activa
Grandària	10 μm × 10 μm
Corrent llindar	1 mA
Potència làser de sortida	10 mW
Eficiència de potència	50 %
Amplada de banda de modulació	20 GHz

115

TAULA 2. Característiques d'un làser modern.

Cal subratllar com a fet important la recent obtenció de làsers blaus (1996) per S. Nakamura fent servir GaN, la qual cosa ha permès completar tot l'espectre visible. Aquests làsers també contribueixen a accelerar el progrés en el món de la computació, ja que en tenir una longitud d'ona menor permeten multiplicar la capacitat d'emmagatzematge dels discs compactes.

Com s'ha dit al llarg d'aquestes pàgines, les tecnologies de la informació i les comunicacions estan influïnt poderosament en la manera de viure de la humanitat actual. Afecten tant els nostres comportaments més personals com les estructures més col·lectives. Tant és així que acceleren el pas de la humanitat cap a una convergència planetària, esborrant fronteres i barreres de comunicació. Sembla doncs raonable que s'honorï amb un Premi Nobel aquesta part de la ciència.

Les tecnologies de la informació es fonamenten en els circuits digitals i en els circuits de comunicacions. El desenvolupament d'aquests circuits no hauria estat possible sense les aportacions de Jack Kilby, inventant el circuit integrat, i de Herbert Kroemer i de Zhores I. Alferov, ideant les heteroestructures que han fet possible l'aparició dels làsers i dels transistors d'alta velocitat. Ocupen per tant un lloc rellevant en aquesta ciència, cosa que els fa mereixedors de la distinció rebuda.

Potser les aportacions d'aquests científics no tenen la brillantor teòrica d'altres premis Nobel de física, però les conseqüències socials de les seves contribucions superen, sens dubte, les de molts altres guardonats. Penso que el reconeixement de la tasca d'aquests científics ha arribat una mica tard. Així, R. Noyce no hi ha arribat a temps.

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2000**

**SOBRE EL
PREMI NOBEL D'ECONOMIA**

CONCEDIT A

JAMES J. HECKMAN I

DANIEL L. MCFADDEN,

A CÀRREC DE

JAUME GARCÍA,

DE LA UNIVERSITAT

POMPEU FABRA

**PREMI NOBEL D'ECONOMIA DE L'ANY 2000:
UNA ELECCIÓ ENCERTADA ENTRE UNA MOSTRA
SELECCIONADA**

A James Heckman per les seves contribucions teòriques i metodològiques en l'anàlisi de mostres seleccionades i a Daniel McFadden per les seves contribucions teòriques i metodològiques en l'anàlisi d'eleccions discretes.

Amb aquesta cita, la Reial Acadèmia Sueca de les Ciències fa saber la concessió del Premi Nobel d'Economia de l'any 2000, expressant d'aquesta manera el seu reconeixement als guardonats per les seves aportacions teòriques i metodològiques en el camp de la Microeconometria.

Ambdós guardonats no tenen una formació acadèmica inicial en economia, Heckman és B.A. en Matemàtiques pel Colorado College, mentre que McFadden és B.S. en Física per la Universitat de Minnesota, encara que tots dos són doctors en Economia, Heckman per la Universitat de Princeton l'any 1971 i McFadden per la Universitat de Minnesota l'any 1962.

El paral·lelisme de les seves trajectòries també s'ha traduït en el desenvolupament de carreres acadèmiques molt arrelades a una única universitat, amb un període d'interrupció per anar a una altra institució. Heckman és *Henry Schultz Distinguished Professor* d'Economia a la Universitat de Chicago, on ha desenvolupat tota la seva carrera acadèmica amb un breu parèntesi a la Universitat de Yale (1988-1990), mentre que McFadden és actualment *E. Morris Cox Professor* d'Economia a la Universitat de Berkeley, amb un parèntesi, més llarg que en el cas de Heckman, a l'Institut Tecnològic de Massachusetts (1978-1991).

Tots dos guardonats formen part del grup d'investigadors que en els darrers anys han contribuït a consolidar una disciplina dintre del camp més genèric de l'Econometria que ara té una entitat pròpia: la Microeconometria.

QUÈ ÉS LA MICROECONOMETRIA?

Entre els aspectes que han marcat el desenvolupament de l'Econometria com a disciplina des dels seus inicis, tant oficinosos com oficials,¹ podem destacar-ne dos: el tipus d'informació a la qual es pot accedir i, per tant, utilitzar en el treball empíric, i la disponibilitat de mitjans de càlcul que permetin processar aquesta informació. En aquest sentit, en la dècada dels setanta i començament dels vuitanta assistim a una creixent accessibilitat a bases de dades provinents d'enquestes, en les quals les observacions corresponen a individus en sentit ampli, ja siguin persones físiques, unitats familiars o empreses,² les quals presenten unes singularitats marcadament diferents a les corresponents a les dades temporals. Així, podem destacar un major pes de la informació de tipus qualitatiu (per exemple, estat civil de les persones, comunitat autònoma de residència, sector d'activitat econòmica, tipus d'ocupació, tipus de transport emprat per desplaçar-se de casa a la feina, la marca comprada per a un producte concret), una major rellevància dels aspectes lligats a la manera com s'ha triat la mostra de les enquestes (normalment els procediments de mostreig acostumen a ser estratificats o estan referits a grups concrets no representatius de la població), una major freqüència de situacions de no-observabilitat d'alguna variable rellevant per a una part de la mostra o per a la seva totalitat (el salari que rebria un individu al sector privat si està treballant en el sector públic, els gustos o les preferències dels individus), o la major adequació d'aquesta informació per analitzar el comportament que

119

1. L'*Econometric Society* es crea l'any 1931, però alguns historiadors de l'Econometria (Morgan, 1990) ja troben indicis d'aquesta disciplina en les opinions d'alguns economistes de finals del segle XIX, com ara Jevons, que encaixen perfectament en els plantejaments que expressa Frisch (1933) en l'editorial del primer volum de la revista *Econometrica*.

2. Exemples d'aquest tipus d'informació per al cas espanyol serien, entre d'altres: l'*Encuesta de Población Activa*, l'*Encuesta de Presupuestos Familiares*, l'*Encuesta Industrial*, la *Central de Balances*, l'*Encuesta de Estructura Salarial* o l'*Encuesta Nacional de Salud*.

els models teòrics de tipus microeconòmic postulen per als agents econòmics.

La Microeconometria centra l'atenció en tots els aspectes de tipus estadístic però també de tipus metodològic (especificació) relacionats amb els temes anteriorment esmentats, que són propis de l'anàlisi econòmica aplicada, encara que alguns d'ells també siguin rellevants en altres disciplines, sobretot de l'àmbit de les ciències socials.

Prenguem com a exemple l'anàlisi de la discriminació salarial per motius de gènere. L'ús de dades individuals permet comparar, mitjançant l'anàlisi de regressió, quina part de la diferència observada entre les mitjanes dels salaris d'homes i dones és deguda a les diferents característiques (variables explicatives) d'aquestes dues poblacions i quina part es deu a la diferent retribució de les mateixes (coeficients), aquesta última la que s'associa a la discriminació. L'especificació d'aquestes equacions d'ingressos acostuma a tenir una forma funcional de tipus semilogarítmic derivada de models senzills basats en la teoria del capital humà, i inclou com a variables explicatives les típiques d'aquest plantejament, entre les quals n'hi ha algunes de tipus qualitatiu, com per exemple l'educació, i altres que també són qualitatives i que fan referència a característiques del lloc de treball o al sector d'activitat econòmica. D'altra banda, la mostra d'individus que treballen, que són aquells per als quals s'observa el salari, no té per què ser representativa de la població, sobretot en el cas de les dones amb una menor participació, cosa que fa que les mostres que es poden utilitzar siguin mostres seleccionades, aspecte que s'ha de tenir en compte a l'hora d'estimar consistentment els paràmetres d'aquests models. Fins i tot recentment s'ha generalitzat l'anàlisi procedint a comparar no solament les mitjanes per a ambdues poblacions, sinó tota la distribució, a través d'un plantejament més flexible com és la regressió quantílica, que permet que els nivells de discriminació puguin ser diferents segons els punts de la distribució de salaris per a homes i dones que comparem.

La concessió del Premi Nobel a Daniel McFadden està basada en les seves contribucions metodològiques a l'anàlisi empírica de models que miren d'explicar decisions dels individus: models d'elecció discreta.

En aquest tipus de model la variable endògena és una variable qualitativa que fa referència a una decisió o a una situació. Per exemple, en l'anàlisi de la demanda de transport la variable a explicar acostuma a ser quin és el tipus de transport emprat pels individus per fer els seus desplaçaments (cotxe, tren, autobús, a peu). És a dir, la variable endògena és una variable qualitativa que fa que l'anàlisi estàndard del model de regressió no sigui aplicable.

Ja des dels anys cinquanta s'han desenvolupat models de tipus probabilístic per analitzar els determinants de les probabilitats de triar una alternativa o una altra. És el cas del model lògit, popularitzat per Berkson (1951) i del model pròbit (Aitchison i Silvey, 1957), que difereixen en la forma de la distribució usada per calcular les probabilitats associades a cada alternativa.

La principal contribució de McFadden és el conegut model lògit condicional (McFadden, 1973), no tant perquè es tracta d'una generalització del model lògit multinomial, ja desenvolupat en la bibliografia en aquells moments, sinó perquè la seva derivació està basada en un model de comportament de maximització de la utilitat per part dels individus.

Davant l'elecció per part d'un individu «*i*» entre *J* alternatives, McFadden suposa que la utilitat associada a cada alternativa depèn de les característiques d'aquest individu (*X*), de les característiques de l'alternativa, que poden ser diferents per a cada individu (*Z*), i d'un conjunt de característiques inobservables que representen les preferències o gustos, escollint aquella alternativa que té la utilitat més alta. Per exemple, en el cas de la demanda de transport en el vector de característiques *X* s'inclourien variables com els ingressos de l'individu, la zona on resideix o la seva posició en la unitat familiar, entre d'altres, i en el vector *Z* s'inclourien variables com el temps emprat en el desplaçament o el

cost del desplaçament, totes dependents de la modalitat de transport triada.³

Suposant que la utilitat és lineal en les característiques X , Z i els termes aleatoris no observables, els quals segueixen una distribució *extreme-value Type I* independent i idèntica per a cada alternativa, la probabilitat que l'individu «i» triï l'alternativa «j» ($P_{i,j}$) serà:

$$P_{i,j} = \frac{e^{X_i \beta_j + Z_{i,j} \alpha}}{\sum_{k=1}^J e^{X_i \beta_k + Z_{i,k} \alpha}}$$

on β_j és el vector de coeficients de les variables corresponents a les característiques dels individus (X) i α el vector de coeficients corresponents a les característiques de les alternatives (Z). La forma d'aquestes probabilitats comporta una propietat per a aquest model d'importantes implicacions empíriques: la independència de les alternatives irrelevantes. Sobre la base de l'expressió anterior, la relació entre les probabilitats de triar dues alternatives «j» i «k» és la mateixa, sigui quin sigui el conjunt de les alternatives entre les quals es pot escollir, tal com es pot observar en l'expressió següent:

$$\frac{P_{i,j}}{P_{i,k}} = \frac{e^{X_i \beta_j + Z_{i,j} \alpha}}{e^{X_i \beta_k + Z_{i,k} \alpha}}$$

Aquesta propietat és poc realista en situacions on algunes de les alternatives són gairebé substitutives, atès que implica que la probabilitat d'escollir una alternativa es veu modificada en la mateixa proporció per a totes les alternatives per l'aparició d'una nova alternativa o la desaparició d'una de les existents. L'exemple habitualment emprat per il·lustrar aquesta propietat és el referit al cas

3. Cal destacar que el terme que recull els factors inobservables en el context d'aquest model té el paper de garantir que no necessàriament individus amb idèntiques característiques, tant personals com referides a l'alternativa, siguin observats fent la mateixa elecció.

del transport. Suposem que la probabilitat d'escollir d'anar amb cotxe de casa a la feina és $2/3$ i que la d'anar amb autobús (vermell) és $1/3$, és a dir, el quocient entre aquestes dues probabilitats serà 2. Si l'autoritat responsable decideix pintar de blau la meitat dels autobusos i entenem que ara hi ha tres alternatives disponibles (cotxe, autobús vermell i autobús blau), segons el model lògit (tant en la seva versió multinomial com en la condicional), suposant que les probabilitats d'anar amb autobús d'un o altre color són iguals, en el cas d'un model lògit la probabilitat d'anar amb cotxe passarà a ser $1/2$ i les corresponents a anar amb autobús seran en tots dos casos $1/4$. Aquest és un resultat contraintuitiu, ja que esperaríem que la d'anar amb cotxe continués essent $2/3$ i les d'anar amb autobús $1/6$ en cada cas. Les prediccions del model lògit estan «forçades» per la propietat d'independència de les alternatives irrelevantes que es deriva de la forma de les probabilitats d'aquest model.

Aquest és i ha estat un model àmpliament usat en la bibliografia per la seva facilitat de còmput enfront d'altres models alternatius, com el model pròbit, quan el nombre d'alternatives és elevat.

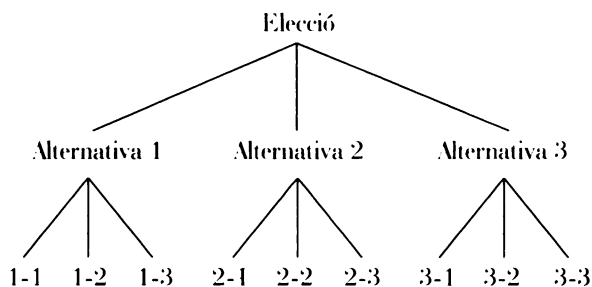
McFadden ha fet contribucions posteriors rellevants en aquest àmbit, la majoria dedicades a superar les limitacions del model lògit ja esmentades. Així, en el seu treball de l'any 1973 ja proposa una adaptació del coeficient de determinació del model de regressió per mesurar la capacitat explicativa d'aquests models d'elecció discreta basada en la comparació dels valors de la funció de versemblança del model estimat amb la del model que només conté un terme constant per a cada alternativa. En treballs posteriors proposa tests d'especificació per a l'omissió de variables rellevants basats en el test dels multiplicadors de Lagrange però calculat sobre la base d'una regressió auxiliar (McFadden, 1987).

Per superar les limitacions del model lògit, en qualsevol de les seves dues versions, condicional o multinomial, McFadden (1978) proposa generalitzar el model lògit mitjançant l'especificació d'una distribució per als termes aleatoris d'aquest model, que superi, en concret, la restrictiva independència d'aquests termes entre alternatives, causa fonamental de la propietat de la inde-

pendència de les alternatives irrelevantes. Proposa d'usar una funció de distribució, la *generalized extreme value*, que inclou com a cas particular la distribució del model lògit, essent possible contrastar la hipòtesi nul·la de l'adequació del model lògit mitjançant un contrast d'hipòtesi referit a un paràmetre. Aquest model té una interpretació més senzilla en termes del que es coneix com el model lògit niat.

El model implica que les diferents alternatives es poden agrupar de manera natural segons el grau de similitud, tal com queda reflectit en el gràfic següent:

124



Les nou possibles alternatives estan distribuïdes en tres grups (alternatives 1, 2 i 3), de tal manera que aquesta especificació implica que dintre de cada grup el model que aplica és el logit, mentre que entre les tres grans alternatives la formulació trenca la independència de les alternatives irrelevantes. Així, si desapareix una de les alternatives, per exemple la 1-1, això no modificarà la relació entre les probabilitats de 1-2 i 1-3, però sí que pot modificar les seves relacions amb les probabilitats d'altres alternatives.

Com que aquests models niats són difícils d'estimar quan el nombre d'alternatives és gran, i com que en alguns casos la manera d'agrupar les alternatives no és única ni en la mateixa seqüència, s'han desenvolupat contrastos de la hipòtesi d'independència de les alternatives irrelevantes, basats únicament i exclusivament en l'estimació del model sota la hipòtesi nul·la, és a dir, el model lògit (multinomial o condicional). McFadden ha contribuït també en aquesta

línia de recerca. McFadden (1984) es proposa d'usar un test dels multiplicadors de Lagrange per contrastar aquesta hipòtesi, mentre que a Hausman i McFadden (1984) es procedeix a contrastar aquesta hipòtesi comparant les estimacions dels vectors de paràmetres per a un subconjunt d'alternatives en el cas d'usar tota la mostra i en el cas de fer servir la submostra d'observacions que han escollit aquestes alternatives,⁴ mitjançant una versió adaptada del mètode general de contrastació de Hausman (1978) basat en la comparació de dos estimadors consistents sota la hipòtesi nul·la, però que en canvi sota l'alternativa només un d'ells preserva la consistència.⁵ Posteriorment, McFadden (1987) mostra com es poden obtenir versions asimptòticament equivalents d'aquests dos tests mitjançant la significació de regressions auxiliars.

Finalment, cal destacar la contribució de McFadden a l'estimació de models d'elecció discreta en general, no únicament els models tipus lògit, que presenten elevades dificultats de càlcul a l'hora d'avaluar les probabilitats corresponents. Aquest és el cas del model pròbit multinomial, proposat per Hausman i Wise (1978) com a alternativa al model lògit multinomial, però que comporta avaluar, per procediments numèrics, integrals corresponents a probabilitats d'una distribució normal multivariant d'ordre $J-1$, cosa que fa que el càlcul d'aquestes integrals sigui factible fins a quatre alternatives però que ja no sigui factible per a un nombre elevat d'alternatives.

McFadden (1989) proposa el mètode d'estimació per simulació⁶ basat en la idea de generar replicacions dels termes aleatoris

4. La idea implícita d'aquest contrast és que si les alternatives són independents en el sentit comentat, llavors la probabilitat de triar una alternativa entre J d'elles és igual a la probabilitat de escollir-la entre totes les J alternatives condicionat a estar entre les J .

5. Aquest test a nivell empíric presenta ocasionalment problemes perquè la diferència entre la matriu de variàncies i covariàncies del model estimat amb el subconjunt de les alternatives i la corresponent al model amb totes les alternatives no és sempre definida positiva, com es desprèn del marc teòric.

6. A McFadden i Ruud (1994) hi ha una presentació detallada d'aquest mètode d'estimació en un context més ampli que el dels models d'elecció discreta.

inobservables i construir les probabilitats ajustades per a cada alternativa (en funció dels paràmetres a estimar) com la mitjana de les decisions (1 si l'elecció és la de l'alternativa en qüestió, 0 en cas contrari) que correspondrien a aquestes replicacions, per tal de procedir a usar-les en el context d'un estimador de moments basat en la no-correlació entre els errors (diferència entre la decisió i la probabilitat d'escollir una alternativa) i un conjunt d'instruments.⁷

ESTIMACIÓ AMB MOSTRES SELECCIONADES

La concessió del Premi Nobel a James Heckman està basada en les seves contribucions metodològiques a l'anàlisi empírica de models amb mostres seleccionades.

Suposem que volem estimar la mitjana dels ingressos de les famílies catalanes. Si seleccionem una mostra entre aquelles famílies en les quals el cognom del cap de família comença per A no sembla que la manera de seleccionar la mostra hagi d'afectar l'estimació de l'esmentat paràmetre. Donat l'objectiu que es pretén, la mostra serà representativa de la població. En canvi, si escollíssim la mostra entre aquelles famílies en les quals el cap de família té estudis superiors, la mostra estaria seleccionada d'acord amb un criteri relacionat amb la variable per a la qual volem estimar la mitjana i, consegüentment, sobreestimaríem la mitjana dels ingressos de la població a partir d'aquesta informació.

En essència, el model de regressió pretén estimar la mitjana de la variable endògena condicionada al conjunt de variables explicatives. Un dels supòsits habituals en el model de regressió és que la mostra amb què es pretén estimar el model és una mostra representativa de la població o, dit d'una altra manera, que si

7. Aquest procediment proposat per McFadden supera les limitacions de la proposta de Lerman i Manski (1981), consistent a utilitzar aquestes probabilitats simulades a la funció de versemblança i maximitzar-la, però la consistència del procediment requereix que el nombre de replicacions tendeixi a infinit amb la mida de la mostra.

el model està correctament especificat, l'esperança del terme de pertorbació condicionada a la mostra amb la qual s'estima el model és zero. En canvi, si la mostra està seleccionada amb un criteri relacionat amb el terme de pertorbació, l'esperança del terme de pertorbació condicionat a la mostra deixa de ser zero i, per tant, els mínims quadrats ordinaris (MQO) són inconsistents. Heckman (1976) analitza aquest tema en el context d'un model més general que engloba altres models amb característiques similars al model de selecció de la mostra.

Suposem que pretenem estimar un model d'oferta de treball de característiques similars a l'estimat per Heckman (1974), on l'equació d'hores (h) té l'especificació següent, atès que per als individus que no treballen, $h = 0$,

$$\begin{aligned} h_i &= X_i' \beta + \gamma w_i + u_i & \text{si } X_i' \beta + \gamma w_i + u_i &> 0 \\ &= 0 & \text{si } X_i' \beta + \gamma w_i + u_i &\leq 0 \end{aligned}$$

on X_i és un vector de variables explicatives, w_i és el salari net de l'individu i i la variable u_i correspon al terme de pertorbació. L'estructura d'aquest model és la d'un model tipus Tobit,⁸ on els salaris no són observables per a aquells que no treballen ($h_i = 0$), per la qual cosa és necessari especificar una equació de salaris com la següent per completar el model,

$$w_i = Z_i' \delta + \varepsilon_i$$

on Z_i és un vector de característiques explicatives dels salaris i ε_i és el corresponent terme de pertorbació.

Heckman (1974) estima conjuntament per màxima versemblança les dues equacions, tenint en compte els problemes de selecció de la mostra de l'equació de salaris i també la potencial en-

8. Aquest model va ser proposat per Tobin, Premi Nobel de l'any 1981 com a procediment per estimar equacions de demanda amb dades individuals en presència de zeros (Tobin, 1958).

dogeneïtat dels salaris a l'equació d'oferta de treball, però en el seu article de 1976 proposa un procediment basat en l'ús de MQO per estimar l'equació de salaris. En concret la funció de regressió seria:

$$E(w_i | h_i > 0) = Z_i' \delta + E(e_i | h_i > 0)$$

la qual es pot expressar en termes de la forma reduïda de l'equació d'oferta de treball⁹ com

$$E(w_i | e_i > -X_i^* \beta^*) = Z_i' \delta + E(\varepsilon_i | e_i > -X_i^* \beta^*)$$

on queda manifest que l'esperança del terme de pertorbació no és zero en la mesura que ε_i i e_i (el terme de pertorbació de la forma reduïda de l'equació d'hores) no estiguin relacionades. De fet, sota el supòsit de normalitat per a les pertorbacions, la funció de regressió seria

$$E(w_i | e_i > -X_i^* \beta^*) = Z_i' \delta + \sigma_{\varepsilon} \lambda_i$$

on λ és el conegut «terme de correcció de Heckman». Aquesta equació es pot estimar per MQO si disposem d'informació per a totes les observacions de totes les variables explicatives llevat del salari, en cas contrari s'haurà d'aplicar el mètode de la màxima versemblança. Heckman (1979) interpreta el biaix en l'estimació de δ com un problema d'omissió de variables rellevants proposant un procediment bietàpic per estimar consistentment els paràmetres d'aquesta equació,¹⁰ procediment que s'ha estès també a models de característiques similars al de selecció, com és el model de *swit-ching* (Lee, 1978).

9. El criteri de selecció expressat en termes de la forma reduïda és equivalent al del salari de reserva per sota del qual l'individu no treballa.

10. A García (1991) es realitza un estudi de simulació per valorar els biaixos de diferents mètodes d'estimació aplicats a un model d'oferta de treball que també inclou una equació de salaris. Els biaixos són importants, fins al 30 %, sobretot quan el percentatge d'observacions per a les quals s'observa el salari és petit.

Aquest model de selecció de la mostra neix fonamentalment com a solució d'un problema d'inobservabilitat, però posteriorment ha estat usat com una de les possibles generalitzacions del model Tobit, un model en què la variable endògena pren el valor zero per a un percentatge significatiu d'observacions. L'equació d'oferta de treball anteriorment considerada és un exemple d'aquest tipus de model, en el qual la variable endògena incorpora a la vegada una decisió (o una situació), en aquest cas participar en el mercat de treball, i una característica quantificable en cas de treballar: el nombre d'hores treballades.

La principal limitació del model Tobit¹¹ és que el mateix model explica tant la decisió com els valors positius de la variable endògena, en el cas considerat la situació de participar en el mercat de treball i les hores treballades, essent molts els exemples, inclòs aquest referit a l'oferta de treball, per als quals la restricció que comporta una especificació tipus Tobit no és realista, entre altres raons perquè els zeros poden ser causats per diferents tipus de raons.

Les dues generalitzacions del model Tobit més utilitzades en la bibliografia han estat el model de doble tanca, proposat per Cragg (1971) i el model de selecció de Heckman, entès no com un model per resoldre un problema d'inobservabilitat, sinó com un model que contempla especificacions diferents per a l'equació que explica la decisió i la que explica la quantitat per a valors positius.

La metodologia d'anàlisi de mostres seleccionades és aplicable a un àmbit amb rellevància des d'un punt de vista social: l'avaluació dels programes socials (per exemple, de benestar o de formació). En aquest camp les contribucions de Heckman també han estat importants i han permès entendre més bé què estem avaluant i com ho estem avaluant.

Heckman (1990) presenta una anàlisi comparativa de les

11. L'altre tipus de limitació del model Tobit és la distribucional com a conseqüència de suposar la normalitat i l'homoscedasticitat de les pertorbacions, l'incompliment de les quals comporta la inconsistència de les estimacions per màxima versemblança.

maneres d'avaluar els programes socials, ja siguin resultat d'experiments socials o no, utilitzades en la bibliografia, basades fonamentalment en el càlcul de l'efecte mitjana.¹² Però la qüestió, tal com apunta Heckman, és quin és l'efecte mitjana que volem mesurar. El més habitual ha estat valorar com variaria el resultat del «tractament» (per exemple, el nivell d'ingressos) si una persona aleatòriament escollida seguís un programa social (per exemple, de formació). En el cas més senzill de suposar que modelitzem aquest efecte mitjançant una variable fictícia, l'únic problema econòmic seria controlar el possible biaix generat pel procés de selecció dels participants en el programa en termes de la seva possible correlació amb el terme d'error. En canvi, sembla més interessant quantificar l'efecte mitjana per a aquells qui han decidit participar en el programa, és a dir, condicionat a participar en el programa. Això complica substancialment el procés d'estimació,¹³ atès que el model resultant és un model amb paràmetres d'interès no fixos i correlacionats amb el terme d'error corresponent. Finalment, cal destacar que la identificació dels paràmetres d'interès en aquests models també és un tema rellevant que està tractat entre d'altres en Heckman i Honoré (1990).

A l'últim, encara que estrictament no correspon a la metodologia anteriorment considerada, relacionada amb els problemes d'estimació en mostres seleccionades, cal destacar les aportacions fetes per Heckman en l'anàlisi dels models de durada. És a dir, models que miren d'explicar el temps que un individu passa en un determinat estat, o alternativament, la probabilitat d'abandonar un estat després d'haver-hi estat un determinat temps. En la bibliografia econòmica aquest tipus de models s'han aplicat tradicionalment a l'anàlisi de la durada dels episodis d'atur o a la dels episodis de vaga.

12. Heckman *et al.* (1999) expliciten un conjunt de mesures que serien interessants més enllà de l'efecte mitjana i que comportarien l'anàlisi de canvis en la distribució, no únicament en la mitjana. En aquest aspecte cal destacar la contribució de Heckman *et al.* (1997).

13. A Heckman (1997) i Heckman *et al.* (1998) es discuteixen dos mètodes d'estimació per a aquest tipus de model.

En aquests models la probabilitat d'abandonar un estat després d'haver-hi estat un determinat temps s'aproxima per la funció de «sortida» (*hazard function*), que té una forma funcional lligada a la forma de la funció de distribució de la durada. En aquest context, i donat el tipus de variable (durada), la distribució normal no ha estat usada, encara que sí la lognormal o unes altres de més habituals en aquest àmbit, com l'exponencial o la Weibull. La durada (o la funció de sortida) es fa dependre d'un conjunt de característiques observables per l'econometrista i, llevat de la distribució exponencial, les altres alternatives permeten que es pugui donar un efecte dependència, en el sentit que la probabilitat d'abandonar un estat condicionada a estar-hi un determinat temps (alternativament la funció de sortida) depengui d'aquest temps.

Un dels problemes en aquest terreny és la importància dels factors no observats per l'econometrista i que influeixen en l'esmentada probabilitat. La no-consideració d'aquests factors en l'especificació del model comporta inconsistències importants. D'una banda, se sobreestima la dependència negativa i, d'una altra, s'infravalora l'impacte de les variables explicatives que sí s'observen.

Una part important de les aportacions de Heckman en l'àmbit dels models de durada té a veure amb el fet de mirar d'identificar separadament els efectes de l'heterogeneïtat no observada i els efectes de la dependència respecte del temps en aquest estat. En el cas de l'atur, la diferència esmentada entre aquests dos factors es podria reflectir si aquells que estan en atur tenen una major probabilitat d'estar en l'atur en el futur, bé per la pèrdua d'experiència (de capital humà) o bé per tenir senyals negatius de cara al mercat laboral (*market stigma*). Amb l'efecte heterogeneïtat les dotacions inicials incideixen d'una manera persistent en el fet d'abandonar un determinat estat, mentre que la dependència fa que els efectes de les dotacions inicials s'atenuïn o augmentin amb el pas del temps.

En un treball important, Heckman i Singer (1984) presenten les condicions d'identificació en models on la funció de sortida s'explicita, mentre que per a l'heterogeneïtat no observada no es

proposa cap distribució, només requerint que compleixi les condicions per ser-ho. Les conseqüències de la incorrecta especificació funcional per mirar d'identificar els efectes dels dos factors esmentats es discuteixen en Heckman i Singer (1985), on es demostra que és possible identificar els dos efectes sense imposar formes funcionals concretes, encara que amb la imposició de supòsits restrictius poc encoratjadors, tal com destaca Heckman (1991).

EL PERQUÈ DE L'ELECCIÓ DELS GUARDONATS D'AQUEST ANY

Assar Lindbeck, prestigiós economista suec estretament lligat a la concessió del Premi Nobel d'Economia, escrivia a l'abril de 1989 un article on comentava les dificultats i problemes associats a l'elecció dels guardonats amb aquest premi, centrant l'atenció en quatre aspectes: com s'ha d'entendre l'àmbit de l'economia en la concessió del premi; quins criteris s'han d'aplicar per decidir si un candidat és mereixedor del premi; quin ordre s'ha de seguir en l'atorgament del premi, i quan el premi ha de ser compartit.

Tal com indica Lindbeck, la interpretació que l'Acadèmia fa del terme ciències econòmiques és ampli en la mesura en què la interdisciplinarietat s'ha considerat important sempre que comporti implicacions rellevants en termes econòmics. Els casos de Heckman i McFadden encaixen en moltes de les diferents accepcions que les contribucions d'anteriors guardonats hagin pogut tenir. Podríem destacar l'especificitat de les seves contribucions més importants, però al mateix temps han fet contribucions en camps diferents, han contribuït al desenvolupament de la Microeconometria com a disciplina i han fet aportacions interdisciplinàries, no únicament per l'ús de l'instrumental estadístic o la seva influència en altres camps, sinó també pel caràcter que tenen les contribucions empíriques dels dos guardonats.

Amb relació als criteris, Lindbeck esmenta l'originalitat, la rellevància científica i pràctica, la incidència en el treball científic i, fins a cert punt, l'impacte en la societat en sentit ampli, incloent-hi les polítiques públiques. Tots aquests aspectes requereixen el pas

del temps per contrastar la qualitat i la rellevància de les contribucions. Segons Lindbeck, per a l'Acadèmia prima la qualitat sobre la quantitat, ja sigui de nominacions o de cites. Les contribucions de Heckman i McFadden destil·len originalitat, han incidit de manera clara i manifesta en el treball empíric en moltes àrees, i també en el posterior treball metodològic en microeconometria, han estat contribucions nombroses i freqüentment citades per la seva rellevància i han tingut incidència en la societat en un sentit ampli. Només cal recordar els estudis sobre la demanda potencial del sistema de transport ràpid (BART) a San Francisco, o l'aplicació del seu model de valoració contingent aplicat als recursos naturals emprat en la valoració dels danys al medi ambient generats pel desastre de l'Exxon Valdez a Alaska l'any 1989, pel que fa a les aportacions de McFadden. Les contribucions de Heckman han millorat els processos d'avaluació de programes socials o han contribuït a valorar l'impacte de les polítiques de discriminació positiva o sobre els drets civils en la situació econòmica dels afroamericans.

Les concessions d'aquest any corresponen al segon dels criteris d'ordenació cronològica dels candidats apuntat per Lindbeck: mantenir una visió pluralista de la recerca en economia, premiant diferents camps de l'anàlisi econòmica, amb enfocaments diversos i amb diferents visions del món. El premi d'aquest any és clarament un premi a l'Econometria i, en concret, a la Microeconometria. Són els primers guardonats en aquest camp concret, la Microeconometria, i han obtingut el quart premi concedit a un econometrista al llarg dels trenta-dos anys d'existència del Premi Nobel d'Economia, després dels guardons a Ragnar Frisch i Jan Tinbergen (1969), Lawrence R. Klein (1980) i Trygve Haavelmo (1989) segons el camp destacat en la cita de la Reial Acadèmia Sueca de les Ciències.¹⁴ Sens dubte, són dos dels més destacats

133

14. Alguns altres guardonats han fet contribucions substantives al camp de l'Econometria, encara que no siguin les destacades per a la concessió del Premi. És el cas de Tjalling C. Koopmans, guardonat l'any 1975, amb importants contribucions al camp de l'estimació de models econòmics, o James Tobin, guardonat l'any 1981, amb una aportació crucial en l'àmbit dels models microeconòmics per a l'anàlisi de la demanda, tal com s'ha destacat anteriorment.

participants en el desenvolupament en els darrers trenta anys d'aquesta disciplina. Altres també podien haver estat mereixedors del premi com a representants de la mateixa, però probablement són els dos economistes amb unes contribucions específiques de més impacte i difusió entre la professió. Entre els qui es dediquen a l'anàlisi econòmica i fan ús de tècniques microeconòmiques, qui no ha utilitzat la *lambda* de Heckman a l'hora d'estimar un model, o el model lògit multinomial i ha vist freqüentment en els *outputs* de les estimacions la informació del R^2 de McFadden (nom de l'autor inclòs).

En relació amb l'últim aspecte lligat als problemes i a les dificultats a l'hora de decidir els guardonats, el dotzè premi compartit en Economia respon al caràcter complementari de les aportacions d'ambdós guardonats amb el comú denominador de l'anàlisi microeconòmica. Formen part d'un grup de premis compartits entre els quals, segons Lindbeck, també estan inclosos els d'Ohlin i Meade (1977), els de Lewis i Schultz (1979) i els de Fogel i North (1993).

Per acabar, unes quantes dades estadístiques que lliguen amb el camp dels guardonats. Destacar que Heckman i McFadden són els números 45 i 46 de la llista de guanyadors d'un Premi Nobel d'Economia, que formen part dels trenta que han estat atorgats a ciutadans dels Estats Units, i que els seus premis són el novè atorgat a un professor de la Universitat de Chicago i el tercer a un de la Universitat de Berkeley. Així mateix, el premi d'aquest any encaixa en una de les tendències en l'anàlisi econòmica durant aquesta segona meitat del segle XX, en opinió de Lindbeck, com és la creixent importància del mètodes quantitius i, en concret, de l'Econometria.

COMENTARIS FINALS

De tot el que hem dit, inclosa la cita de la Reial Acadèmia Sueca de les Ciències, no hauríem de concloure que la concessió del Premi Nobel d'aquest any a James Heckman i Daniel McFadden es deu

exclusivament a les seves aportacions com a econometristes. Encara que segurament sí que són les que poden haver tingut més impacte i les que justifiquen el caràcter compartit del premi, no són els únics camps en què han fet aportacions importants. Heckman, com ja s'ha esmentat, ha treballat en temes d'economia laboral (oferta de treball, models de durada, educació i ingressos), en temes relacionats amb l'avaluació de projectes socials, o amb les polítiques de drets civils i discriminació positiva. Per la seva banda, McFadden ha treballat també en temes de teoria de la producció, de medi ambient, o darrerament en temes relacionats amb el comportament econòmic de la gent de més edat.

Però encara més important, ambdós economistes són un excel·lent exponent del treball de recerca rigorós i ben fet amb implicacions rellevants per a l'anàlisi empírica i la presa de decisions. Precisament per aquest motiu, dintre del *seleccionat* col·lectiu d'investigadors que comparteixen aquestes virtuts, ells representen una *elecció* encertada.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ATCHISON, J.; SILVEY, S. (1957). «The Generalization of Probit Analysis to the Case of Multiple Responses», *Biometrika*, núm. 44, p. 131-140.
- BERKSON, J. (1951). «Why I Prefer Logits to Probits», *Biometrika*, núm. 7, p. 327-339.
- CRAGG, J. (1971). «Some Statistical Models for Limited Dependent Variables with Application to the Demand for Durable Goods», *Econometrica*, núm. 39, p. 829-844.
- FRISCH, R. (1933). «Editorial», *Econometrica*, núm. 1, p. 1-4.
- GARCÍA, J. (1991). «Métodos de estimación de modelos de oferta de trabajo basados en la predicción de los salarios», *Investigaciones Económicas*, núm. 15, p. 429-455.
- HAUSMAN, J. (1978). «Specification Tests in Econometrics», *Econometrica*, núm. 46, p. 1251-1272.
- HAUSMAN, J.; MCFADDEN, D. (1984). «Specification Tests for the Multinomial Logit Model», *Econometrica*, núm. 52, p. 1219-1240.
- HAUSMAN, J.; WISE, D. (1978). «A Conditional Probit Model for Qualitative Choice: Discrete Decisions Recognizing Interdependence and Heterogenous Preferences», *Econometrica*, núm. 46, p. 403-426.
- HECKMAN, J. J. (1974). «Shadow Prices, Market Wages and Labor Supply», *Econometrica*, núm. 42, p. 679-694.
- (1976). «The Common Structure of Statistical Models of Truncation, Sample Selection and Limited Dependent Variables and a Simple Estimator for such Models», *Annals of Economic and Social Measurement*, núm. 5, p. 475-492.
- (1979). «Sample Selection Bias as a Specification Error», *Econometrica*, núm. 47, p. 153-161.
- (1990). «Varieties of Sample Selection», *American Economic Review, Papers and Proceedings*, núm. 80, p. 313-318.
- (1997). «Instrumental Variables: A Study of Implicit Behavioral Assumptions in one Widely used Estimator», *Journal of Human Resources*, núm. 32, p. 441-461.

- HECKMAN, J. J.; HONORÉ, B. (1990). «The Empirical Content of the Roy Model», *Econometrica*, núm. 58, p. 1121-1149.
- HECKMAN, J. J.; SMITH, J.; CLEMENTS, N. (1997). «Making the Most Out of Programme Evaluations and Social Experiments: Accounting for Heterogeneity in Programme Impacts», *Review of Economic Studies*, núm. 64, p. 487-535.
- HECKMAN, J. J.; ICHIMURA, H.; TODD, P. (1998). «Matching as an Econometric Evaluation Estimator», *Review of Economic Studies*, núm. 65, p. 261-294.
- HECKMAN, J. J.; LALONDE, R.; SMITH, J. (1999). «The Economics and Econometrics of Active Labor Market Programs». A: ASHENFELTER, O.; CARD, D. [eds.]. *Handbook of Labor Economics*, vol. 3A. Amsterdam, p. 1865-2097.
- LEE, L-F. (1978). «Unionism and Relative Wage Rates: A Simultaneous Equations Model with Qualitative and Limited Dependent Variables», *International Economic Review*, núm. 19, p. 415-433.
- LERMAN, S.; MANSKI, C. (1981). «On the Use of Simulated Frequencies to Approximate Choice Probabilities». A: MANSKI, C.; MCFADDEN, D. [eds.], *Structural Analysis of Discrete Data with Economic Applications*, MIT Press, p. 305-319.
- LINDBECK, A. (1999). «The Sveriges Riksbank (Bank of Sweden) Prize in Economics Sciences in Memory of Alfred Nobel», disponible a www.nobel.se
- MCFADDEN, D. (1973). «Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior». A: ZAREMBKA, P. [ed.], *Frontiers in Econometrics*. Nova York: Academic Press, p. 105-140.
- (1978). «Modelling the Choice of Residential Location». A: KARLQVIST, K.; LUNDQVIST, L.; SNICKARS, F.; WEIBULL, J. [eds.], *Spatial Interaction Theory and Planning Models*. Amsterdam, p. 75-96.
- (1984). «Econometric Analysis of Qualitative Response Models». A: GRILICHES, Z.; INTRILIGATOR, M. [eds.], *Handbook of Econometrics*, vol. 2. Amsterdam, p. 1395-1457.
- (1987). «Regression-Based Specification Tests for the Multinomial Logit Model», *Journal of Econometrics*, núm. 34, p. 63-82.

- (1989). «A Method of Simulated Moments for Estimation of Discrete Response Models without Numerical Integration», *Econometrica*, núm. 57, p. 995-1026.
- McFADDEN, D.; RUUD, P. (1994). «Estimation by Simulation», *Review of Economics and Statistics*, núm. 76, p. 591-608.
- MORGAN, M. S. (1990). *The History of Econometric Ideas*. Cambridge: Cambridge University Press.
- TOBIN, J. (1958). «Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables», *Econometrica*, núm. 26, p. 24-36.

AQUESTA OBRA S'HA ACABAT D'IMPRIMIR
A L'OBRADOR DE LIMPERGRAF, SL
A BARBERÀ DEL VALLÈS
EL DIA 13 DE JUNY DE 2001

