

institut

Els Premis Nobel

d'estudis

PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
3 / 2000

de l'any 1999

Cicle de conferències

catalans

**PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
3 / 2000**

This One



05N3-KYB-193U



Els Premis Nobel

PUBLICACIONS
DE LA
PRESIDÈNCIA
3 / 2000

de l'any 1999

Cicle de conferències

Els **Premis** Nobel de l'any 1999 : cicle de conferències. — (Publicacions de la Presidència ; 3)

Conté: Sobre el Premi Nobel de Medicina concedit a Günter Blobel / a càrrec de José Luis Rosa. Sobre el Premi Nobel de Literatura concedit a Günter Grass / a càrrec de M. Loreto Vilar. Sobre el Premi Nobel de Química concedit a Ahmed Zewail / a càrrec de Josep M. Lluch. Sobre el Premi Nobel de Física concedit a Gerardus T. Hoofst i Martinus J. G. Veltman / a càrrec de Domènec Espriu. Sobre el Premi Nobel d'Economia concedit a Robert A. Mundell / a càrrec de Jordi Caballé

Bibliografia

ISBN 84-7283-522-7

I. Institut d'Estudis Catalans II. Col·lecció: Publicacions de la Presidència ; 3

1. Premis Nobel

06.068 (042)

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: setembre de 2000

Tiratge: 500 exemplars

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

Imprès a Limpergraf, SL

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

ISBN: 84-7283-522-7

Dipòsit Legal: B. 33011-2000

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.

INDEX

Introducció

7

Sobre el Premi Nobel de Medicina concedit a Günter Blobel,
a càrrec de José Luis Rosa

9

Sobre el Premi Nobel de Literatura concedit a Günter Grass,
a càrrec de M. Loreto Vilar

17

Sobre el Premi Nobel de Química concedit a Ahmed Zewail,
a càrrec de Josep M. Lluch

41

Sobre el Premi Nobel de Física concedit a
Gerardus T. Hooft i Martinus J. G. Veltman,
a càrrec de Domènec Espriu

65

Sobre el Premi Nobel d'Economia concedit a Robert A. Mundell,
a càrrec de Jordi Caballé

97



Cada tardor, amb curiositat i, darrerament, amb l'atent seguiment dels mitjans de comunicació, les diferents comunitats científiques aventuren, esperen i celebren la notificació, feta per l'Acadèmia Sueca de les Ciències, de l'atorgament dels Premis Nobel. Amb la comunicació dels guardonats i el lliurament, unes setmanes més tard, dels premis culmina un llarg procés de consulta, nominacions, discussions, esperances i moltes decepcions que, finalment, acaba amb l'atorgament dels preuats premis de l'any. Repassant els Premis Nobel de Medicina, Economia, Física, Química i Literatura atorgats durant el passat, fem un viatge esquemàtic i breu per la història de la ciència i la literatura recents. L'existència de la llista temàtica de premis, fruit de la història, ja és en si mateix un tema discutit, atès que és cert que, temàticament, la llista de premis s'hauria de reformar a partir de les característiques actuals de la investigació en ciència i literatura. Tanmateix, els guardons actuals representen un reconeixement oficial d'allò que les diferents comunitats especialitzades, molt sovint, ja reconeixen implícitament i, a la vegada, donen relleu i reconeixement públic i notori al progrés del coneixement en les disciplines premiades.

La ciència al nostre país ha experimentat, durant els darrers trenta anys, una evolució remarcable que mereix ser destacada. Afortunadament, han passat els anys en què algun pretensió científic de casa nostra feia pública ostentació escrita que havia rebut una carta del Comitè Nobel per demanar-li la seva opinió sobre possibles candidats al guardó. Avui, en canvi, és relativament habitual que científics del país rebin la carta en què hom els demana de fer propostes de nominació. Seguim essent, però, un país petit científicament parlant i encara amb poca incidència en el món de la ciència. No obstant això, tots els indicadors mostren un avançament i un progrés continu de la nostra comunitat científica, i això vol dir que, a poc a poc, ens anirem acostant a ser intèrprets en primera persona en el concert científic internacional. A hores d'ara no tenim, encara, cap guardonat amb un Premi Nobel; però, en canvi, comença a ser freqüent que, en donar-se a conèixer els premis, es pugui recórrer a per-

sones que han tingut contacte directe amb els premiats o que han treballat directament amb el tema objecte del premi.

És justament aquesta característica la causa que l'Institut d'Estudis Catalans, mitjançant les societats filials temàticament afins a les disciplines dels premis –la Societat Catalana de Biologia, la Societat Catalana de Química, la Societat Catalana de Física, la Societat Catalana d'Economia i Societat Catalana de Llengua i Literatura–, hagi promogut la iniciativa d'organitzar, cada any, i durant una setmana, un cicle de cinc conferències sobre els Premis Nobel atorgats aquell mateix any. Amb aquesta activitat, l'Institut materialitza una de les seves línies d'activitat –la difusió de l'alta investigació–, i, a la vegada, amb la publicació del text de les conferències, vol posar a l'abast de la societat unes interessants ressenyes sobre els guardonats amb el Premi Nobel i sobre el tema pel qual han rebut el premi, fetes per experts en la matèria i per persones que, d'una manera o altra, poden donar una visió propera i fresca dels guardonats i dels guardons.

Des de l'Institut d'Estudis Catalans confiem que aquesta iniciativa sigui útil per a la comunitat científica del país i que es consolidi al llarg del temps com un dels esdeveniments científics de cada tardor.

JOSEP ENRIC LLEBOT
Secretari científic

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 1999
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE MEDICINA
CONCEDIT A
GÜNTER BLOBEL.
A CÀRREC DE
JOSÉ LUIS ROSA.
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA**

Des que al 1901 es va atorgar el primer Premi Nobel de Medicina al doctor Emil A. von Behring pels seus treballs d'immunització contra el tètanus i la diftèria, aquest premi anual s'ha convertit al llarg d'aquest segle en el guardó més prestigiós en el camp de les ciències biomèdiques. El passat 11 d'octubre l'Assemblea Nobel a l'Institut Karolinska de Suècia va comunicar la concessió d'aquest guardó al doctor Günter Blobel (Universitat de Rockefeller, Institut Mèdic Howard Hughes, Nova York) pel descobriment que «les proteïnes tenen senyals intrínsecs que governen el seu transport i localització en la cèl·lula».

BREU HISTORIAL ACADÈMIC I CIENTÍFIC

El doctor Blobel va néixer a Waltersdorf (Alemanya) el 21 de maig de 1936. Va realitzar els seus estudis de Medicina a la Universitat de Tübingen (Alemanya) i es va llicenciar l'any 1960. Després va marxar als Estats Units, on va fer el doctorat en Oncologia dirigit pel doctor van Potter a la Universitat de Wisconsin (Madison). L'any 1967, als trenta-un anys, va entrar al laboratori del doctor George Palade (Premi Nobel de Medicina l'any 1974 compartit amb Albert Claude i Christian de Dube) pels seus estudis sobre l'estructura cel·lular i transport de proteïnes cap a l'exterior cel·lular) a la Universitat Rockefeller com a becari postdoctoral, i a partir d'aquesta data va continuar tota la carrera acadèmica i científica vinculat a aquesta universitat passant per les diferents categories: *Assistant Professor* (1969), *Associate Professor* (1973), *Professor* (1976), *Investigator* (1986, Institut Mèdic Howard Hughes) i *John D. Rockefeller Jr. Professor* (1992). El professor Günter Blobel és membre de nombroses societats científiques i ha participat i participa en l'elaboració de diferents revistes científiques com a revisor i editor. Durant la seva dilatada carrera científica ha estat guardonat amb prestigiosos premis científics com l'Albert Lasker (1993), el Ciba Drew (1995) o el King Faisal (1996) per enumerar alguns dels més recents previs al Nobel. La capacitat de treball del doc-

tor Blobel queda reflectida en els més de tres-cents articles que té publicats (una producció científica d'aproximadament nou articles per any) i alhora en la qualitat d'aquests treballs, perquè han estat publicats en les revistes de més prestigi en el camp de la biologia cel·lular.

LA HIPÒTESI DEL SENYAL

En una cèl·lula eucariota podem distingir aproximadament una dotzena de compartiments amb funcions específiques. Aquests compartiments o orgànuls estan rodejats per una membrana lipídica i, encara que les membranes són impermeables a les proteïnes, podem trobar-les formant part de les membranes i a l'interior dels compartiments. Essencialment, les proteïnes són sintetitzades pels ribosomes en només un compartiment cel·lular, el citoplasma (malgrat que unes quantes són sintetitzades en el mitoplasma dels mitocondris i en el cloroplasma dels cloroplasts) i, per tant, s'han de dirigir, un cop sintetitzades, a la membrana o compartiment específic on realitzen la seva funció. Com es produeix aquest procés?, com es dirigeix la proteïna a la seva localització correcta?, quins són els mecanismes involucrats en el transport de les proteïnes a l'interior dels orgànuls o en la seva integració a la membrana? Les respostes donades pel doctor Blobel a aquestes preguntes bàsiques li han permès d'obtenir el Premi Nobel.

Des de la seva incorporació al laboratori del també premiador doctor Palade, el doctor Blobel es va interessar en com les proteïnes acabades de sintetitzar, destinades a ser transportades a l'exterior cel·lular com les immunoglobulines, eren dirigides i translocaven a l'interior del reticle endoplasmàtic. Els seus estudis el van portar a formular el 1971, amb el doctor David Sabatini, la denominada *hipòtesi del senyal* (*signal hypothesis*). Van postular que la proteïna que s'havia de secretar devia contenir un senyal intrínsec que el dirigia a les membranes del reticle. Aquesta hipòtesi no es va poder demostrar fins a l'any 1975.

quan en una sèrie d'articles el grup del doctor Blobel va demostrar que aquest senyal era una seqüència d'aminoàcids curta (també denominat *pèptid senyal* o *seqüència senyal*) que formava part de la proteïna acabada de sintetitzar. La hipòtesi del senyal va resultar que era correcta i universal: se'n van trobar en cèl·lules de llevat, plantes o animals. A més, en col·laboració amb altres grups, ràpidament es va poder demostrar que senyals intrínsecs similars dirigien el transport de proteïnes a altres orgànuls intracel·lulars. Això el va portar a formular el 1980 uns principis generals per a dirigir les proteïnes al seu compartiment subcel·lular específic. Cada proteïna conté en la seva estructura la informació necessària per a especificar la seva correcta localització a la cèl·lula. Seqüències d'aminoàcids específiques (que denominà *senyals* o *seqüències topogèniques*) determinen si una proteïna passarà a través de la membrana d'un orgànel·lar, si es quedarà integrada a la membrana, o si serà dirigida cap a l'exterior cel·lular. Avui sabem que aquests senyals consisteixen en uns quants aminoàcids (generalment entre cinc i trenta) que estan presents en les proteïnes acabades de sintetitzar i que indiquen el seu compartiment i membrana de destí. Després d'ancorar-se i translocar-se, aquestes seqüències senyal són freqüentment, tot i que no sempre, eliminades al costat trans de la membrana per endopeptidases específiques de la seqüència senyal.

MECANISMES DE TRANSLOCACIÓ DE PROTEÏNES

Durant els últims vint anys, el grup del doctor Blobel s'ha dedicat a dissecar etapa per etapa els mecanismes involucrats en el transport i translocació a través de les membranes de les proteïnes que contenen seqüències topogèniques. Gràcies a aquests estudis i a les aportacions d'altres grups en coneixem almenys dos mecanismes. En el primer, la translocació es produeix a través d'uns canals que permeten el pas de les proteïnes (PCC, *protein conducting channels*). En aquest mecanisme, l'exemple més

estudiat del qual seria la translocació de proteïnes a través de la membrana del reticle endoplasmàtic, la seqüència senyal és inicialment reconeguda per una partícula o factor soluble que reconeix el senyal (SRP, *signal-recognition particle*). Aquest complex funciona com un lligand que és reconegut per un receptor en la membrana destí. Després de la unió al receptor, la seqüència senyal és alliberada i serveix a la vegada com un lligand per a obrir un canal (PCC) per a conduir la proteïna, que allhora permet la translocació a través de la membrana. A causa del diàmetre limitat del canal (~ 2 nm), la proteïna travessa el canal en una configuració desplegada mitjançant l'ajuda de proteïnes de plegament. Després de la translocació, el canal es tanca fins a ser obert per la seqüència senyal d'una altra proteïna quan és translocada. Aquest canal també permet la integració de proteïnes a la membrana. En aquests casos la proteïna, quan és integrada, fa servir una seqüència senyal per obrir el canal i translocar-s'hi a través fins que una altra seqüència (seqüència de parada) interactua amb el canal fent que es deturi la transferència i obrint-lo lateralment a la bicapa lipídica. Com a resultat, el segment de la cadena polipeptídica localitzada en el canal es desplaça a la membrana lipídica i integra la proteïna de membrana. D'aquesta manera, aquests canals conductors de proteïna tenen la capacitat de reconèixer seqüències senyal en la cadena polipeptídica que es transloca. Un mecanisme similar s'ha descrit per a proteïnes que es transloquen a través de les membranes de cloroplasts, mitocondris i peroxisomes.

El segon mecanisme, completament diferent al descrit anteriorment, es refereix a la translocació de proteïnes a través del complex del porus nuclear. Aquest complex enorme (s'estima en 125 milions Da) té forma circular (~ 100 nm de diàmetre) i es troba en l'embolcall nuclear. Aquest complex té una obertura o porus interior de 25 nm de diàmetre que permet el pas de proteïnes en una configuració no desplegada. A diferència del mecanisme anterior, aquest complex del porus nuclear no integra proteïnes en la membrana lipídica i permet un transport bidireccional i no limitat a proteïnes. Hi ha diferents tipus de seqüències

senyal que etiqueten les proteïnes que han de ser importades al nucli. Aquestes seqüències de senyal nuclear són reconegudes per unes proteïnes denominades *karioferines* o *importines*. El complex resultant pot ancorar-se en múltiples llocs d'unes fibres que es troben a ambdós costats del porus nuclear, cosa que permet la concentració de les proteïnes nuclears a prop del porus nuclear. Una proteïna de la família de Ras denominada *Ran* i diverses proteïnes que regulen l'activitat de Ran estan involucrades en l'alliberament del complex unit a les fibres i al seu pas a través del porus nuclear. L'exportació de proteïnes o nucleoproteïnes és mitjançada per la mateixa seqüència senyal que la importació i, tot i que presenta un mecanisme semblant, s'observen algunes asimetries en la funció de les proteïnes que regulen el transport (Ran i els seus moduladors) i la intervenció d'una família de proteïnes diferents a les importines denominades *exportines* però que tenen una funció similar.

14

IMPORTÀNCIA D'AQUESTES INVESTIGACIONS

El descobriment que les proteïnes tenen senyals que governen el seu transport i localització en la cèl·lula ha tingut un gran impacte en la biologia cel·lular moderna. Quan una cèl·lula es divideix, s'han de sintetitzar grans quantitats de proteïnes i s'han de formar nous òrgànuls. Perquè la cèl·lula funcioni correctament, cada proteïna ha de dirigir-se a la seva localització específica. Les investigacions del doctor Blobel han contribuït a comprendre els mecanismes moleculars que regulen aquests processos. A més, el coneixement sobre els senyals topogènics ha permès la comprensió de molts altres mecanismes d'importància biomèdica (per exemple, la producció d'anticòs, les infeccions víriques, etc.).

Les investigacions del doctor Blobel també han ajudat a explicar els mecanismes moleculars que estan al darrere d'algunes malalties genètiques. Si una seqüència senyal d'una proteïna és canviada, la proteïna pot anar a un lloc incorrecte dins de la

cèl·lula. Un exemple d'aquest tipus de malalties és la hiperoxalúria primària, que causa una acumulació de pedres al ronyó en persones molts joves. La seqüència senyal en l'enzim hepàtic al·lànina: glioxilat aminotransferasa el dirigeix normalment als peroxosomes. En els pacients amb aquesta malaltia el senyal és alterat i la proteïna és dirigida als mitocondris, cosa que produeix nivells molt elevats d'oxalat que s'eliminen per l'orina. Les sals d'oxalat són molt insolubles i formen pedres al ronyó. Altres exemples poden ser alguns casos d'hipercolesterolèmia familiar en què s'observa uns nivells molt elevats de colesterol a la sang a causa de deficiències en els senyals de transport; en la fibrosi quística, causada perquè les proteïnes no arriben a la seva destinació correcta, etc.

FUTURES APLICACIONS

En els propers anys podrem deduir l'estructura i els senyals topogènics de totes les proteïnes que codifica el genoma humà. Aquest coneixement incrementarà la nostra comprensió d'algunes malalties i podrà ser usat per al desenvolupament de noves estratègies terapèutiques, fet que tindrà una gran repercussió en el camp de la biotecnologia i la teràpia gènica. Actualment s'utilitzen els coneixements dels senyals topogènics per a la producció, usualment en bacteri, de proteïnes que usem com a fàrmacs, per exemple, la insulina, l'hormona de creixement, la eritropoetina o l'interferó. Altres proteïnes que podrien tenir una aplicació terapèutica, com per exemple els factors de creixement, han de ser sintetitzades en cèl·lules eucariotes (llevat, cèl·lules d'insecte, etc.) perquè siguin funcionals. Els gens responsables de codificar aquestes proteïnes es podran modificar amb seqüències senyal que permetin una producció elevada de la proteïna funcional en aquestes cèl·lules, les quals es convertiran en factories proteiques. A més, aquesta tecnologia es podrà utilitzar per al disseny de nous fàrmacs que siguin destinats a òrgans concrets, on corregiran un defecte específic.



**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 1999
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE LITERATURA
CONCEDIT A
GÜNTER GRASS.
A CÀRREC DE
M. LORETO VILAR.
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA**

«La rata ha rebut el Premi Nobel», diu Günter Grass al seu discurs en motiu de la concessió del Premi Nobel de Literatura 1999.¹ Així ho avançava el narrador al capítol cinquè de la novel·la *Die Rättin* («La rata femella»), publicada aviat farà catorze anys: feia temps que figurava a la llista de candidats, la rata de laboratori de cabells blancs i ulls vermells, en representació de totes les altres rates i de milions d'animals de laboratori. Per tant, i des d'aquest punt de vista purament literari, l'Acadèmia Sueca de Ciències no li és estranya a l'escriptor sempre motiu de controvèrsia a la seva pàtria alemanya reunificada. Perquè estima la seva professió com estima Alemanya, a la qual no pot estalviar la crítica. I aquesta no sempre és plaent als vencedors. Fa cinquanta anys, segueix Günter Grass davant l'Acadèmia Sueca, que suporta amb gust la servitud literària, que mastega frases fibroses per fer unes farinetes dòcils, que remuga per si mateix en la més bella soledat literària i només porta al paper allò que, pronunciat, ha trobat els seus tons canviants, demostrant la seva ressonància i el seu eco. L'oralitat és, doncs, sempre present a l'obra literària de Grass com ho és la seva capacitat per encisar plana a plana al lector-oient, que és obligat a fer ús de tots els sentits per introduir-se al món creat per l'autor. D'aquesta manera es guanya el pa el xaman que hi ha en l'escriptor alemany.

Günter Grass només tenia dotze anys quan va saber amb tota certesa que volia ser artista: pintor o escultor eren les dedicacions que més li agradaven. També pensava en l'escenografia, perquè sempre s'havia sentit atret pel teatre gràcies a una influència molt positiva de la mare en aquest sentit. Era l'any 1939, just al començament de la Segona Guerra Mundial. Un any més tard s'havia decidit la seva especialització professional

1. Günter Grass, *Continuarà...: Discorso de Günter Grass con motivo de la concesión del Premio Nobel de Literatura 1999*, p. 1 (trad. Miguel Sáenz).

cap a la literatura. El motiu era ben trivial: una revista hitleriana havia convocat un concurs de narracions i prometia premis. Immediatament, aquell noieta de prop del suburbi de Danzig-Langfuhr, actualment la polonesa Gdansk, va començar a escriure la seva primera novel·la que, sempre sota l'ascendent matern, es titulava *Die Kaschuben* («Els caixubis»). D'aquesta manera volia l'adolescent Grass fer honor a aquell antic poble eslav del qual provenia la meitat de si mateix. Ja allà va quedar palès el seu compromís constant amb la denúncia de la injustícia. L'acció no tenia lloc en el dolorós moment històric contemporani al començament de la guerra, sinó que se situava al segle XIII, a l'època de l'Interregne, un temps espantós sense emperador, circumstància que aprofitaven els saltejadors de camins i els bandolers per fer de les seves atemorint als camperols, els quals només podien recórrer a la seva pròpia justícia, que era la dels tribunals de la Santa Velme. La conseqüència d'un desplegament de violència literàriament massa fidel a la realitat d'aquell temps era el fet que al final del primer capítol tots els personatges principals i bona part dels secundaris eren morts. I com que no es tractava pas d'escriure una novel·la en què el protagonisme el tinguessin els esperits d'aquests finats, Grass va considerar que aquest primer intent literari era un fracàs. Calia, doncs, assabentar-se bé de com se les empescaven els escriptors consagrats per narrar encisant el públic lector i alhora tractant els seus personatges de ficció d'una forma més cautelosa i econòmica. Així, el jove aspirant a escriptor va dedicar-se amb ganes a llegir. Grass devorava llibres i més llibres, mentre aprenia a concentrar-se enmig del garbuix que representava viure en un habitatge de dues habitacions. Abismat en la lectura i en el món d'allò narrat, un dia no va adonar-se de com la seva mare, colpida d'admiració per l'interès del seu fill però al mateix temps amant de la broma, li havia canviat una fleca de pa amb mantega que ell tenia al costat del llibre del moment i que anava mossegant de tant en tant, per una pastilla de sabó. El noi, sense apartar la vista del paper, va agafar el sabó i li va clavar queixalada sense pensar-s'hi, i no va adonar-se de què tenia a la

boca fins al cap d'una bona estona, el llarg minut que havia calgut per arrencar-lo del seu relat.

La mare de Günter Grass, una dona de negocis acostumada a fer quadrar els números i a administrar la seva botiga d'ultramarians, era al mateix temps una persona dotada de sentit artístic, encisada per la bellesa. Anava sovint al teatre i a vegades s'hi deixava acompanyar pel seu fill. S'aprenia de memòria melodies d'òpera que escoltava d'un receptor de ràdio popular i escoltava amb gust les històries que el noi li explicava. També li agradava llegir i era membre d'un club del llibre. A la seva biblioteca casolana hi havia les novel·les de Dostoievski i les de Tolstoi al costat d'algunes de Hamsun, de Raabe i de Vicki Baum. Selma Lagerlöf hi era igualment representada. Aquest tresor matern va suposar el primer impuls; després Grass va acudir a la biblioteca municipal. L'actitud romàntica amb la qual el seu entorn petitburgès considerava els artistes, aquella barreja d'espant i admiració, ben segur que va contribuir al fet que la senyora Grass estimulés aquelles qualitats innates del seu fill. Sobretot després de la mort de dos oncles del noi, caiguts a la Primera Guerra Mundial, i que estaven dotats també d'una certa disposició artística.

La capacitat per somniar despert durant llargues estones, el gust per l'acudit verbal i els jocs de paraules, la passió per mentir sense guanyar-hi res, només perquè la descripció fidel de la realitat hauria estat massa avorrida... tot el que d'una manera vaga s'anomena talent —segueix Grass davant l'Acadèmia Sueca—, existia aleshores sens dubte, però fou la brusca irrupció de la política enmig de l'idil·li familiar el que va atorgar a aquell talent que navegava massa lleuger un llast permanent, un cert calat. L'escriptura i la política són, per tant, i des dels seus inicis, indestruïbles en la persona de Günter Grass. El cosí preferit de la seva mare, caixubi com ella i funcionari del correu polonès de l'Estat Lliure de Danzig, es trobava entre els afusellats defensors de l'edifici de correus de la plaça Hevelius contra els atacs de la Milícia Nacional de les SS. Aquest fet, immediatament esborrat de la memòria de la família, va quedar gravat per sem-

pre en el record d'aquell vailet que va anar a la guerra amb quinze anys i que als setze va ser testimoni de com la pregunta de Goebbels: «Voleu la guerra total?» desencadenava en ell una decidida promptitud al sacrifici. Fins al mateix final de la lluita armada. Grass, presoner de guerra americà als disset anys, estava totalment convençut de la justesa d'aquella guerra. Fou en el marc del corresponent programa de «reeducació» que va veure per primera vegada el camp de concentració de Dachau a Baviera, a prop de Múnic. Contemplava les dutxes i els forns crematoris i no s'ho podia creure. Als dinou anys havia començat a intuir la culpabilitat conscient i inconscient que el poble alemany havia amuntegat, la càrrega i la responsabilitat que haurien de suportar la seva generació i la següent.

Treballant en una mina de potassa després de l'experiència personal del nacionalsocialisme, i essent testimoni de les picabaralles entre comunistes amargats i socialdemòcrates de tota la vida que pensaven rectilíniament des de Bebel fins a Schumacher, Grass va aprendre a viure sense ideologia. I com que trobava en el to dels representants de la ideologia comunista un deix de la malauradament ben coneguda musiqueta nacionalsocialista, va estimar-se més escoltar els lacònics socialdemòcrates, que no prometien cap imperi mil·lenari ni deien ximpleries sobre la revolució mundial. Finalment va decantar-se per la professió de picapedrer i escultor, i va anar a exercitar-se a diverses acadèmies artístiques. Esculpia, dibuixava, escrivia poemes trivials i peces teatrals grotesques i també tocava en una banda de jazz. Durant la primavera i l'estiu de l'any 1952, Grass va recórrer França de dalt a baix fent autoestop, vivint de no res, dibuixant sobre paper d'embalar i escrivint sense parar. Un dels productes d'aquella «diarrea» lingüística, terme emprat pel mateix autor,² fou justament un llarg poema on apareixia l'estilita Oskar Matzerath, el qual, però, encara no es deia així. Més

2. Günter Grass, *Werkausgabe in zehn Bänden*, ed. Völker Neuhaus, vol. 9: *Essays Reden Briefe Kommentare*, ed. Daniela Hermes, Glatz a; V. NEUHAUS, Günter Grass, p. 211.

interessant que no pas el poema en si mateix, una barreja de diverses influències literàries des de Trakl i Apollinaire fins a Ringelnatz i Rilke, juntament amb detalls provinents de traduccions qüestionables de Lorca, era la recerca d'una perspectiva distant. El major problema de la visió de Fanacoreta al cim de la columna era però el seu estaticisme. Aquesta dificultat va resoldre's posteriorment amb l'aparició d'Oskar Matzerath, aquell marrec de tres anys al qual els seus noranta-quatre centímetres d'alçada atorgaven alhora distància i mobilitat. De fet, podríem considerar el petit Oskar un estilista amb la polaritat invertida. Cap a finals d'aquell estiu, durant el viatge de retorn cap a Düsseldorf, Grass va tenir ocasió d'observar una escena ben banal: un nen d'uns tres anys, absort completament en un timbal de llauna que duïa penjat al coll, mentre els adults que tenien cura d'ell xerraven i preuien cafè. Aquell jove timbaler va desbancar immediatament l'estilista. L'abandó, l'oblit de si mateix de l'infant amb el seu instrument i la manera com simultàniament ignorava el món dels adults que gaudien de la conversa mentre preuien el cafè d'havent dinat, van captivar l'escriptor. Calia igualment fer revivre aquell cosí de la mare afusellat i oblidat al començament de la guerra, fer-ne una figura literària amb un nom nou. Amb materials d'aquí i d'allà Grass estava covant la idea de la seva primera novel·la, mentre que les ganes de dedicar-se a l'escriptura competien encara amb la seva formació per a ser escultor. Si bé la seva activitat literària fins aleshores era reconeguda —a la primavera del 1955 Grass rebé una invitació per fer una lectura de les seves obres manuscrites davant els autors del Grup 47 a Berlín, que van acollir la seva poesia amb una plaent atenció—, fou la seva estada de quatre anys a París que va acabar de decantar-lo vers la professió literària.

L'esbós inicial i els tres primers manuscrits de la novel·la que Grass ja titulava *Die Blechtrommel* («El timbal de llauna») no van servir per a res més que no fos alimentar la calefacció de la seva cambra de treball parisenca. De cop i volta, després d'haver escrit la primera, ara ben coneguda, frase: «Ho reconec: sóc estudiant d'una casa de salut [...]», va desaparèixer el bloqueig i

les paraules van començar a fluir lentament. El relat d'Oskar Matzerath anava apareixent capítol rere capítol dels records i la fantasia, del plaer pel joe i l'obsessió detallista. Autor i protagonista descobrien pas a pas una relació íntima que permetia al primer de crear magistralment i al segon d'exigir amb èxit un tarannà propi, la perspectiva d'un nen que ben aviat, als tres anys, havia decidit no créixer més perquè el món dels adults no li acabava de fer el pes. Així, a la cambra humida on es trobava la calefacció del pis de dues habitacions que servia d'habitatge al mateix escriptor i a la seva esposa, es va perfilar el caràcter d'una figura clarament provinent de l'escola morisca espanyola de la novel·la picaresca, que viu de la comicitat del fracàs. L'agudeses d'Oskar Matzerath li permet de fer burla dels poderosos, però sense oblidar que mai no aconseguirà enderrocar els seus palaus. En té prou si pot fer que la seva majestuositat aparegui de manera sòrdida, si pot fer trontollar mínimament els seus trons, i, sobretot, s'atreveix a qualsevol cosa, fins i tot a fer pesigolles al lector amb allò més escabros. Tanmateix, diu Günter Grass davant l'Acadèmia Sueca, no es tractava pas de crear una mena d'«heroi negatiu» per contraposar-lo als «herois positius» que la nostra cultura occidental postmoderna sembla necessitar: aquests «Rambos», aquests agents «007», que pavimenten amb cadàvers el seu camí cap a l'èxit i encara, entre mort i mort, tenen temps per copular amb l'última bellesa que ha tingut la sort de topar-se amb ells. Grass es val d'un dels múltiples perdedors i de la seva riota sarcàstica per conjurar l'esgarrifosa història alemanya més recent, que tothom provava si no era possible d'esborrar, almenys d'oblidar.

Amb la publicació de la novel·la *El timbal de llauima* el 1959, Grass va possibilitar un nou començament a la literatura escrita en llengua alemanya després de la destrucció, també lingüística, que havien representat els llargs anys de nacionalsocialisme. Aquesta obra aconseguia amb èxit l'objectiu que s'havia imposat l'autor de revisar la història que li era contemporània, narrar des de l'òptica d'aquell seu poble alemany que es feia el desentès quan li parlaven de les desorbitades mentides nacional-

socialistes, justament perquè se les havia empassades. Al mateix temps, Grass rebutava les possibilitats del realisme col·locant la saviesa diabòlica del protagonista i narrador dins la reduïda complexió d'un nen de tres anys, un monstre que observa impassible la humanitat des de la distància que li confereixen les seves peculiars característiques físiques, i la venç amb l'ajuda del seu timbal de joguina. L'inoblidable Oskar Matzerath és certament un intel·lectual que es val de la seva infantil ingenuïtat com a mètode crític. L'aconseguida visió final de la Bruixa Negra palesa el paral·lelisme entre l'evolució d'aquest protagonista i allò que el simbolisme de la negror representa per al poble alemany. Tot esperant que el seu pare enllesteixi les anguiles per al conflictiu sopar del Divendres Sant, i mentre es concentra embolcallat i penetrat pels càlids vapors dels abrics dins de l'armari del dormitori, l'Oskar es deixa transportar per la imaginació fins al consultori del doctor Hollatz, on retroba, gràcies a la figura de la infermera Inge, tot un món d'associacions i sensacions lligades a la blancor immaculada del seu uniforme pulcrament enmudonat, escut d'un senzill afibllat adornat amb una creu concupiscentment roja. El blanc esdevé roig, i el roig, negre, aquell negre de la Bruixa Negra que ara visiona per primera vegada i que fa tanta por als nens com ell, un negre que vol amagar-se en el blau, el groc i el verd, però que, malgrat tot, no aconsegueix deixar de ser negre. Hi ha múltiples interpretacions possibles del simbolisme dels tons cromàtics que apareixen al llarg de la novel·la. És sorprenent, per exemple, l'evident coincidència entre els colors del timbal de llautina i els de Polònia —i també de Gdansk. Això no obstant, el cert és que al final de l'obra tots els colors s'identifiquen amb el color de la mort: el negre de la Bruixa Negra. El relat d'Oskar Matzerath sobre la seva vida fora del sanatori acaba amb el seu desig de retornar sota les faldilles de la seva àvia Anna Koljaiczek, que per a ell representa just el contrari d'aquella visió esgarrifosa. El protagonista, que ara té trenta anys i ha hagut d'acceptar créixer —ara mesura cent vint-i-un centímetres—, anhela tornar al claustre matern i intueix la mort fent rodar la pel·lícula de la seva vida cap enrere fins al mateix

naixement. Però això no pot ser: a tot arreu el persegueix el funest rostre de la Bruixa Negra.

Sempre darrere meu la Bruixa Negra.
Ara davant meu, de cara, també Negra.
Fa servir abric negre i paraules negres.
Paga amb diners negres, la Negra.
Però els infants, si canten, ja no canten:
Que hi és la Bruixa Negra? Sí, sí, sí!³

L'edició de les seves dues primeres novel·les, *El timbal de llaua* i *Hundejahre* («Anys de gos») i de la novel·la curta intercalada, *Katz und Maus* («El gat i la rata»), obres conegudes com la *Danziger Trilogie* («Trilogia de Danzig»), quan encara era un escriptor prou jove, va fer aprendre a Günter Grass que la literatura pot provocar, a part d'escàndol, també ràbia, odi. Diu davant l'Acadèmia Sueca: «Allò que, per amor, no li havia estalviat al meu país, fou llegit com si embrutés el meu propi niu. Des de llavors se'm considera controvertit».⁴ Ell, però, no se'n queixa pas i accepta el risc de la professió que finalment havia escollit, més aviat li resulta estimulante el fet de ser permanentment controvertit. En un breu espai de temps, Grass havia obtingut un lloc destacat entre els grans poetes èpics del segle XX, havia aconseguit una fama mundial. Llavors, als anys seixanta, l'escriptor es convertiria a més a més en una figura important de la vida pública política alemanya. Precisament per la seva forta politització, les obres que aparegueren en aquesta dècada, algunes peces teatrals com ara *Die Plebejer proben den Aufstand* («Els plebeus assagen la revolta»), la novel·la *Örtlich betäubt* («Anestèsia local») i també alguns poemes com els del volum *Ausgefragt* («Interrogat»), foren rebudes amb una crítica eminentment negativa. De fet, al seu *Aus dem Tagebuch einer Schnecke* («Diari d'un car-

3. Günter GRASS, *El timbal de llaua*, p. 538 (trad. J. Fontcuberta i Gel).

4. Günter GRASS, *Continuaré...*, p. 5.

gol»). publicat el 1972, relata amb tota mena de detalls la campanya electoral de 1969 que va portar el triomf del socialdemòcrata Willy Brandt sobre el que havia estat canceller federal fins aleshores, Kurt Georg Kiesinger, candidat de la Unió Cristiana Democràtica i membre del partit nacionalsocialista durant el Tercer Reich. Al final del capítol vint-i-nou, l'autor posa un exemple ben encertat per aclarir la dualitat de la seva persona: l'escriptor Grass explica amb els mitjans que li ofereix la seva professió com és el polític Grass. Tot jugant amb dos sotavassos de cervesa, intenta respondre a la qüestió d'uns joves escriptors que se li apropen i li demanen si la seva activitat literària no se'n ressent sota aquell compromís polític tan determinat:

[...] «Aquest d'aquí és la meua tasca política, que duc a terme com a socialdemòcrata i ciutadà; aquest altre és el meu manuscrit, la meua professió, el meu no-sé-què». Vaig anar-los separant cada vegada més i més, després vaig apropar-los, vaig col·locar-los estímolats l'un contra l'altre, vaig posar-ne un al cim de l'altre (després aquell al damunt del primer) i vaig dir: «A voltes és difícil, però funciona. No li donin tantes voltes [...]».⁵

Per què Günter Grass sempre ha rebutjat l'etiqueta de literatura compromesa? El compromís és per a ell una evidència, quelcom inherent a la literatura, amb la qual, a llarg termini, s'aconsegueixen èxits en l'àmbit polític i social. Però si el que es pretén és un resultat polític immediat, el canvi urgent d'una situació existent i amb la qual hom no pot estar d'acord de cap manera, llavors el que cal és el compromís del ciutadà actuant en el marc d'unes institucions i uns partits democràtics. Així, l'escriptor que vol ser compromès, no demanant a d'altres que moguin la pedra, sinó col·locant ell mateix la palanca i provant de moure-la, no pot pas fer-ho només des del seu escriptori, li cal fer-ho com a ciutadà, bolcant la taula. En aquest sentit Grass segueix el model

5. Günter GRASS, *Aus dem Tagebuch einer Schnecke*, p. 298-299 (trad. M. L. Vilar).

d'autors com Thomas Mann o Alfred Döblin i, per la seva banda, pren part activa en aquelles accions democràtiques amb els objectius de les quals ell personalment s'identifica. És per això, per exemple, que participa a les campanyes electorals federals dels anys 1965, 1969 i 1972, redacta els discursos polítics del candidat del Partit Socialdemòcrata d'Alemanya, l'emigrant Willy Brandt, i més tard, a finals de 1992, cessa la militància pel seu desacord amb la política d'immigració d'aquest partit. Així mateix el 1988 abandona l'Acadèmia de les Arts de Berlín, de la qual havia estat president de 1983 fins a 1986, per la insuficient solidarització de la reconeguda institució cultural amb l'escriptor Salman Rushdie. Ben coneguda, i molt més polèmica, és la seva constant i lúcida crítica de la manera com s'ha dut a terme el difícil procés de la reunificació alemanya, una visió que Grass ha defensat en nombrosos discursos i conferències i que també ha tematitzat a la seva tan controvertida novel·la *Ein weites Feld* (*Una llarga història*), apareguda el 1995.

La decidida postura de Günter Grass es fonamenta principalment en tres raons. La primera té a veure amb la seva pròpia experiència vital lligada amb la ciutat de Danzig, la pàtria de la seva infantesa que, durant la generació dels seus avis caixubis, va viure la formació del Segon Reich a l'any 1871 com a un procés agressiu dut a terme amb una política germanitzant clarament antipolonesa. En canvi, la situació d'irredemptisme de l'època de l'Estat Lliure de Danzig, que ell mateix va viure a la seva joventut, va generar una actitud extremadament nacionalista just en el sentit oposat: llavors es considerava el retorn a Alemanya com una necessitat imperiosa. Així el començament de la Segona Guerra Mundial va ser benvingut perquè representava l'acompliment de la desitjada reunió amb Alemanya. D'altra banda, Grass critica l'excessiva rapidesa del procés de reunificació de l'Alemanya Federal i l'Alemanya Democràtica, una enorme velocitat que proposa, en lloc de la reflexió i el coneixement de l'altre, únicament la preponderància del factor econòmic, i destaca per damunt de tot la importància desmesurada de la unitat monetària de la República Federal Alemanya. A un famós

discurs pronunciat el 2 d'octubre de 1990 al Reichstag berlinès davant els grups parlamentaris Els Verds i Bündnis 90, titulat sarcàsticament «Ein Schnäppchen namens DDR» ('Una ganga anomenada RDA). Grass denuncia aquesta situació i diu:

[...] És esgarrifós com el marc alemany ha esdevingut un article de fe, com si la buidor d'idees la pogués compensar el diner [...].⁶

A més, Günter Grass esgrimeix una tercera raó en la seva crítica. La culpabilitat, el reconeixement plenament conscient d'aquesta culpabilitat i el dir les coses pel seu nom, que comporta també el desfogar-se de la culpabilitat, són temes constants en tota l'obra del guanyador del Premi Nobel: la culpa envers els jueus i els polonesos present a la *Trilogia de Dantzig* o a *Diari d'un cargol*, envers les dones a *Der Butt* («El rèmol»), envers el Tercer Món a *Zunge zöigen* («Treure la llengua») o envers el planeta Terra que ens acull a *Totes Holz* («Fusta morta»). L'objectiu final d'aquest anomenar les coses pel seu nom no pot ser cap altre que fer obrir els ulls al lector per tal que no es repeteixin els mateixos crims una i altra vegada al llarg de la història. Els responsables, però, no són només individus concrets, sinó també nacions senceres, com, en el cas d'aquella Alemanya igualment unida de la Segona Guerra Mundial, activa o passivament culpable del genocidi. El 1990, en una conferència pronunciada davant d'estudiants amb el títol «Schreiben nach Auschwitz» ('Escriure després d'Auschwitz'), Grass identifica la continuïtat de la separació de les dues Alemanyas amb l'estigma de la causa històrica d'aquella divisió. En el lloc de l'oblit massa ràpid, l'autor proposa el record perenne, cristal·litzat no en una reunificació, sinó en una confederació de les dues repúbliques alemanyes, els avantatges de la qual Grass ja fa molt de temps que repeteix, des de mitjans dels anys seixanta, i resumeix després a un dis-

6. Günter GRASS, «Ein Schnäppchen namens DDR», *Letzte Reden vom Glockengeläut*, p. 54 (trad. M. L. Vilar).

курс pronunciat el mateix any 1990 a l'Acadèmia Evangèlica Tutzing durant el congrés *Neue Antworten auf die deutsche Frage* ('Noves respostes a la qüestió alemanya'), amb el títol «Kurze Rede eines vaterlandslosen Gesellen» ('Breu discurs d'un apàtrida'). La jove narradora de la història corresponent a l'any 1938 de *Mein Jahrhundert* (*El meu segle*), explica com el seu professor d'història s'estima més commemorar el 9 de novembre de 1989 recordant als alumnes el que va passar a Alemanya cinquanta-un anys abans, el 9 de novembre de 1938: la *Reichskristallnacht*, 'la nit dels vidres trencats'. I diu que sense tenir en compte l'interès dels nois i noies de la classe, que volien saber què havia passat en aquella època a la seva ciutat natal, l'«obsessió pel passat» del senyor Hösle, catedràtic d'institut, va ser criticada per gairebé tots els pares d'alumnes, perquè tal com assenyala el seu pare:

Naturalment, no tinc cap objecció que la meua filla s'assabenti de les bestieses que van fer les hordes de l'SA a tot arreu i per desgràcia també aquí a Esslingen, però si us plau, en el moment oportú i no pas just quan, com ara mateix, per fi hi ha un bon motiu d'alegria i el món sencer ens felicita als alemanys...⁷

El professor d'història es defensa amb les següents paraules:

Cap infant no pot entendre l'autèntic significat del final de l'època del mur si no sap quan i com va començar realment la injustícia i què va acabar causant la divisió d'Alemanya.⁸

El senyor Hösle ha de deixar les classes dedicades a aquell tema per a més endavant, però als seus alumnes ja els és

7. Günter GRASS, *El meu segle*, p. 131 (trad. Pilar Estelrich i Arce).

8. Günter GRASS, *El meu segle*, p. 132.

llavors possible d'establir els lligams que té la injustícia sota totes les seves formes i a diferents èpoques, cosa que es comprova quan escriuen una carta de protesta a l'alcalde contra la repatriació a Turquia de Yasir, un company kurd, i de tota la seva família.

Ein weites Feld és el títol original de la novel·la on Günter Grass recrea la història de la reunificació de la RFA i la RDA, i narra fets succeïts entre el 1989 i el 1991. La seva significació en alemany és la d'un gir emprat per indicar que es tracta d'un tema sobre el qual es podria estar discutint llargues estones sense arribar mai a una conclusió definitiva i satisfactòria, amb la qual tothom pogués estar d'acord. Literalment significa un camp vast. Tal com Joan Fontcuberta indica a la presentació de la traducció de l'obra, el mateix autor va demanar expressament als traductors que no ineloguessin en el títol cap matís de cosa «problemàtica». I així és com molt encertadament es va optar per *Una llarga història*, que recull d'alguna manera la idea original. A part d'això, aquesta expressió és una frase que immediatament s'associa a la novel·la *Effi Briest*, que és potser l'obra més coneguda de Theodor Fontane. El pare d'Effi sempre acaba amb aquestes paraules la conversa amb la seva esposa sobre el tema del futur de la filla i, a més, són justament els mots que l'autor escull per concloure la novel·la, un cop la jove protagonista ja ha desaparegut. Hom diria que amb aquest gir Fontane reflecteix la manera que té la societat de finals del segle XIX d'eludir una qüestió que convindria discutir extensament, però que encara no està preparada per canviar: la situació de la dona. Serà interessantíssim, doncs, d'esbrinar la relació que pot haver-hi entre aquest títol manllevat per Günter Grass i el contingut de la novel·la on concentra els últims cent anys d'història d'Alemanya. Tal com ho havia fet el tema femení en l'àmbit social al capdavant del segle XIX, la reunificació alemanya aixeca, sobretot en el camp polític i econòmic, però també en el social, molta polseguera a finals del segle XX. A més, Grass estableix clars paral·lelismes amb el temps històric de Fontane, amb la «primera» unificació d'Alemanya, quan

L'any 1871 es va crear el Segon Reich de la mà de Bismarck i el kàiser Guillem I.

Per a la seva estada a Calcuta des de l'agost de 1986 fins al gener de 1987, Grass portava a l'equipatge entre d'altres obres un avanç editorial de la novel·la de Hans Joachim Schädlich *Tallhorer*. Per la seva banda, la seva esposa Ute duia les obres de Theodor Fontane, el qual es converteix per a Grass en un company de viatge a l'Índia de la terrible deessa Kali, present i avergonyida a *Treure la llengua*. A la narració corresponent a l'any 1987 d'*El meu segle* el mateix Grass ho explica de la manera següent:

[...] Però abans de tenir aquell somni amb tantes conseqüències cal confessar la gelosia que em rosegava, perquè la Ute, que sempre llegia moltes coses i de moltes menes, mentre suportava Calcuta tot aprimant-se cada cop més, llegia un Fontane rere l'altre; per alleugerir el pes de la vida quotidiana portàvem molts llibres a l'equipatge. Però per què només el llegia a ell, el prussià hugonot? Per què llegia amb tanta passió i amb el ventilador engegat el cronista xerraire de la Marca de Brandenburg? Per què sota el cel bengalí i per què precisament Fontane? Llavors, un bon migdia, vaig somniar...

[...] en el somni vaig veure el nostre jardí de Holstein i al bell mig la perera ben carregada de fruits, i sota el sostre de la seva ombra hi seia la Ute prop d'una taula rodona i tenia un home al davant.

[...] Era ell. La Ute hi estava flirtejant. Tenia algun embolic amb algun col·lega meu famós que no va començar a escriure una novel·la rere l'altra fins a una edat avançada; i algunes de les seves novel·les tenien per tema l'adulteri. Fins aleshores en aquesta història somniada jo no hi sortia o bé era només un espectador molt llunyà. Per això en el somni em vaig posar gelós. Més ben dit, en el somni la vivesa o l'astúcia em va ordenar mantenir encoberta la gelosia creixent, actuar amb saviesa o murrieria, és a dir, agafar una cadira que en el somni em quedava a prop, baixar l'escala amb ella i assegurar-me al jardí

sota l'ombra agradablement fresca de la perera a fer companyia a la parella de somni, la Ute i el seu Fontane.

Des de llavors —i això ho dic sempre que conto aquest somni—, van ser un matrimoni de tres persones. Ells dos ja no es van poder separar. A la Ute fins i tot li agradava aquesta solució, i jo em vaig anar familiaritzant cada cop més amb Fontane, fins i tot estant encara a Calcuta vaig començar a llegir tot el que podia aconseguir d'ell, [...] vaig donar-me a conèixer com a fan de Fontane i no em vaig poder alliberar d'ell fins que a Berlín i altres bandes es va demostrar que la història és un animal ruminant i jo, amb el permís de la Ute, el vaig poder prendre per l'abundosa paraula tot perllongant la seva turmentada existència al nostre segle que s'acosta a la fi. D'ençà que —empresonat a la novel·la *Una llarga història*— viu dedicat a la seva immortalitat, ja no aconseguirà afeixugar els meus somnis [...].⁹

32

Tallhoyer, l'espia i policia secret alemany que gràcies a la seva llarguíssima vida de cent trenta-sis anys, des del 1819 fins al 1955, té ocasió d'oferir els seus serveis a tots els possibles règims autoritaris haguts i per haver des de Metternich fins a Ulbricht, representa a l'obra de Schädlich l'absoluta encarnació de la raó d'estat, i és conseqüentment invalidat com a individu. Per això acaba suïcidant-se. Tanmateix, Grass juga amb la idea d'allargar encara més la vida literària de l'agent Tallhoyer, confrontant-lo amb l'escèptic autor realista Fontane, tal com ho està fent ell mateix a Calcuta. Més tard, la caiguda del mur de Berlín i la reunificació alemanya constituiran el context històric adequat per emmarcar aquests dos personatges. El protagonista de la novel·la *Una llarga història* és en Theo Wuttke, conegut de tothom amb el nom de Fonty, no només per haver nascut exactament cent anys després de Theodor Fontane, el penúltim dia de l'any 1919, sinó que, com ell, també a Neuruppin. A més, el conserge Wuttke també s'assembla físicament molt al seu model

9. Günter GRASS, *El meu segle*, p. 307-310.

literari i ja a la primera plana es converteix definitivament en una reencarnació de Fontane, el nom del qual no apareix mai a la novel·la —és *l'Immortal*—. mostra amb les citacions que sempre té a punt que se sap les seves obres com el parenostre. El matrimoni de Fonty, els fills, el seu habitatge al famós districte berlinès de Prenzlauer Berg, els seus problemes econòmics i fins i tot les seves crisis nervioses es corresponen fins al més mínim detall amb els que ens són coneguts de Fontane per les seves cartes i els seus diaris. I Ludwig Hoftaller serà el seu antagonista. L'«Ombra que no el deixava ni de nit ni de dia», i la reencarnació d'aquell espia etern de Schädlich. Ells dos personificaran el contrast entre les grans possibilitats i la catastròfica realitat de la història alemanya. Plegats són testimoni dels agitats mesos que van des de la caiguda del mur de Berlín fins a les conseqüències més immediates de la unió monetària i la reunificació alemanya. El canvi és presentat, no obstant això, des d'una visió obertament negativa, com a liquidació material i moral de la RDA.

A les converses de Fonty i Hoftaller apareix l'assimilació de les dues èpoques històriques. La professió d'en Theo Wuttke al segle XX, corresposal de guerra durant el Tercer Reich, es correspon amb la del seu model literari al segle XIX, que fou historiògraf de la guerra amb França dels anys 1870 i 1871. Tal com Fontane havia relatat les seves impressions de caminant per la Marca de Brandenburg, Fonty viatja donant conferències per a la Lliga Cultural de la RDA. De la mateixa manera com Fontane havia treballat, no pas sense reserves i sempre per motius econòmics, per a la censura prussiana i per al reaccionari Nou Diari Prussià, anomenat popularment *Kreuzzeitung*, l'agent de tots els règims polítics Hoftaller obliga Fonty a certs serveis per la seva pàtria, sempre tenint cura, però, d'amparar-lo i protegir-lo. Com és el cas, per exemple, després de l'expatriació forçosa de Wolf Biermann de la RDA: Fonty engega «tota aquesta llauna cultural»¹⁰ a rodar i la seva «Ombra» aconsegueix

10. Günter GRASS, *Una llarga història*, p. 177 (trad. Joan Fontcuberta i Gel).

col·locar-lo encara que sigui carretejant arxius amunt i avall a la Casa dels Ministeris, aquell edifici emblemàtic que féu construir Hermann Göring per instal·lar-hi el Ministeri de l'aire del Tercer Reich i que, després de la reunificació, es converteix significativament en la seu social de la Treuhand, la societat fiduciària encarregada de la reconversió d'empreses de l'est. El paternòster d'aquest edifici, l'ascensor de cabines continu, esdevindrà el símbol de la història d'Alemanya, que tan aviat transporta a Göring com a Ulbricht i Honecker cap amunt o cap avall. Allunyant-se d'aquells aires de superioritat dels quals erròniament s'acusava Fontane, Fonty pensa en la fugida, però només l'última li sortirà bé: desapareix a les Cevenes amb una néta ara retrobada, descendent d'una relació amb una noia francesa durant la guerra.

[...] Amb una mica de sort ens veurem vivint en un paratge completament despoblat. La petite m'encarrega de saludar l'arxiu, un desig al qual accedeixo de tot cor. Anem sovint a buscar bolets. Si el temps és bo, la vista és magnífica. Diguem de passada que en Briest s'equivocava: jo, almenys, hi veig un final, a la història...¹¹

L'anomenat *papa* de la crítica literària a Alemanya, Marcel Reich-Ranicki, apareixia en un fotomuntatge a la portada del setmanari *Der Spiegel* el mateix any de la publicació d'*Una llarga història* estripant un exemplar de la novel·la. Grass era novament motin de controvèrsia pel fet de valer-se d'una comparació històrica literàriament agosarada per demostrar que en essència res no ha canviat a Alemanya: de la reunificació de finals del segle XX, ell en diu una colonització de l'Estat dels Obrers i dels Camperols per part del capitalisme més salvatge. De la comparació amb la unió de 1871, i també amb l'annexió d'Àustria el 1938, només en pot esperar que les conseqüències d'ara no siguin tan nefastes com les guerres lligades a aquelles unions.

11. Günter GRASS, *Una llarga història*, p. 663.

Solament amb el pas dels anys ha estat possible de constatar que l'obra de Günter Grass no és pas hostil a la interpretació, com la crítica literària pretenia. Cada vegada més es demostra com cadascuna de les obres esdevé un nou fragment d'una gran confessió, un fragment en el sentit romàntic, que s'estén més enllà dels seus propis límits, formant part d'un tot que hom només pot encertar a albirar vagament. La principal dificultat dels primers intents interpretatius rau en el fet que a les novel·les de Grass sempre hi ha un narrador fictici, un ésser dotat d'unes característiques més o menys definides, i que relata la seva història en primera persona, però des d'una perspectiva temporal relativament llunyana. Tanmateix, l'autor sempre ha dit que no és encertat d'identificar, de confondre, aquest narrador-protagonista amb ell mateix. D'altra banda, Grass fa tot el possible per desacreditar el narrador, que és l'únic mitjà que té el lector de la història per accedir a la realitat del que està llegint: la seva seriositat és tot d'una posada en dubte o de cop i volta l'enxampem dient coses contradictòries. Així, amb aquesta forma de *Rollenprosa*, 'prosa de repartiment', emprada per Grass a totes i cadascuna de les seves novel·les i fonamentalment també a les obres dramàtiques, és impossible de penetrar en la posició de l'autor, i atrapar el seu portaveu, el qual no té, doncs, perquè identificar-se necessàriament amb el seu creador. Aquesta característica de l'obra de Grass esdevé encara més peculiar si considerem un altre fenomen que depèn directament de la perspectiva narrativa: el narrador en primera persona està immobilitzat en la seva perspectiva, es contempla a si mateix des de dins i el món que l'envolta des de fora. Sota la influència professional de l'escultura i la literària del *nouveau roman*, de Herman Melville, d'Alfred Döblin o fins i tot de la utilització del llenguatge que Arno Holz fa al seu *Phantastus*, autor i narrador es limiten sempre als objectes concrets, a allò observable, tangible, olorable, degustable. Aquesta idea la recull per exemple el poema *Diana – oder die Gegenstände* ('Diana, o els objectes'), aparegut el 1959:

Quan allarga la mà dreta
per damunt del múscle dret cap al seu carcaix,
mou la cama esquerra cap al davant.

Quan em va ferir,
el seu objecte va ferir la meua ànima,
que li és com un objecte.

Molt sovint és amb objectes en repòs,
que els dilluns topa
el meu genoll.

Ella però, amb la seva llicència de caça,
només es deixa fotografiar corrent
i entremig de gossos.

Quan ella diu sí i fa blanc,
fereix els objectes de la natura
però també de dissecats.

Sempre he refusat
de deixar ferir per una idea sense ombra
el meu cos projector d'ombra.

Però tu, Diana,
amb el teu arc
m'ets objectiva i responsable.¹²

La lírica és una constant a l'obra de Günter Grass. Jun-
tament amb l'escultura i les arts gràfiques constitueix la seva
forma d'expressió artística primigènia, de la qual se serveix
sovint per assajar idees i motius que després utilitzarà i desenvol-
luparà a les obres teatrals o a les novel·les —verbigràcia el

12. Günter GRASS, *Die Gedichte 1955-1986*, p. 111 (trad. M. L. Vilar).

poema de l'estilita que més tard esdevindria el petit timbaler Oskar Matzerath—, arribant fins i tot a unir-les físicament en una sola obra. Aquest és el cas del seu darrer llibre, *El meu segle*, aparegut el 1999, moment idoni, d'altra banda, per la forma de recull que l'autor ha escollit. Allà, Grass presenta cent narracions, cent cròniques, cadascuna dedicada a un any del segle XX, de 1900 a 1999, donant veu a un mosaic de diferents narradors en primera persona, figures històriques i inventades, anònimes i no tan anònimes —escriptors com Erich Maria Remarque, Ernst Jünger o a vegades, i de manera autobiogràfica, el mateix autor—, que expliquen les seves aventures i desventures barrejant grans esdeveniments històrics amb fets inventats, encontres impossibles i anècdotes casolanes. I per a cada narració, per a cada any, l'autor proposa una aquarel·la, una imatge que es troba a mig camí entre la il·lustració i el reportatge gràfic i que converteix el text escrit en una història per llegir o escoltar i per mirar, com ho són els contes infantils però també les revistes polítiques alemanyes de principis de segle. Amb la combinació d'aquests dos elements, la innocència i la imaginació infantil i la sàtira i el sarcasme polític, Grass aconsegueix denunciar els monstres del segle XX, tot preservant allhora la il·lusió del somni de felicitat que res pot prendre a l'ésser humà i al qual hom només pot apropar-se mitjançant la justícia. Li és possible igualment d'unir el seu talent artístic de dibuixant i d'escriptor, i el seu compromís de ciutadà del món preocupat per la injustícia.

Aquest ha estat, doncs, el segle de Günter Grass, però com ell mateix diu davant l'Acadèmia Sueca, la història continuarà, tal com ho feien aquelles narracions que apareixien per entregues (moltes de les novel·les de Fontane, per exemple —i que sempre acabaven amb la promesa d'un «Continuarà...»). La història de la literatura no pot pas acabar amb el segle perquè el seu objectiu encara no s'ha acomplert. Cal treure Occident de la «vall de llàgrimes cultural»¹³ que l'estanca. Un cop la política, diu Grass, ha demostrat la seva vergonyosa dependència

13. Günter GRASS, *Continuarà...*, p. 10.

dels poders econòmics, cal esperar que sigui la literatura la que prengui el relleu i denunciï la injustícia. I encara que el seu futur ja no estigui potser en el llibre imprès, sempre haurà d'haver-hi narradors que ens expliquin les seves històries a cau d'orella, que facin rodar el penyal com ho feia Sísif, com ho fa Günter Grass.

BIBLIOGRAFIA

- GRASS, Günter (1970). *Aneestèsia local*. Barcelona. [Trad. Jordi Moners i Sinyol]
- (1970). *Theaterspiele. Hochwasser. Onkel. Onkel. Noch zehn Minuten bis Buffalo. Die bösen Köche. Die Plebejer proben den Aufstand. Davor*. Berlin: Neuwied.
- (1988). *Zunge zeigen. Ein Tagebuch in Zeichnungen. Prosa und einem Gedicht*. Darmstadt.
- (1990). «Schreiben nach Auschwitz». *Frankfurter Poetik-Vorlesung*. Frankfurt a. M.
- (1990). *Totes Holz*. Ein Nachruf. Göttingen.
- (1991). *Vier Jahrzehnte*. Ein Werkstattbericht. Göttingen: Fritze Margull.
- (1993 [1968]). *El gat i la rata*. Barcelona. [Trad. de Carles Unterlohner]
- (1993). *El timbal de llautna*. Barcelona. [Trad. de Joan Fontcuberta i Gel]
- (1995 [1993]). *Örtlich betäubt. Roman*. Munic.
- (1995). *Die Deutschen und ihre Dichter*. Munic.
- (1997 [1995]). *Ein weites Feld*. Munic.
- (1997). *Una llarga història*. Barcelona. [Trad. Joan Fontcuberta i Gel]
- (1998 [1993]). *Aus dem Tagebuch einer Schnecke*. Munic.
- (1998). *Die Gedichte 1955-1986*. Darmstadt.
- (1999 [1993]). *Der Butt. Roman*. Munic.
- (1999 [1993]). *Die Rätin*. Munic.
- (1999 [1996]). *Gdanskter Trilogie. Die Blechtrommel. Katz und Maus. Hundejahre*. Munic.
- (1999 [1993]). «Ein Schmäppchen namens DDR». *Letzte Reden vom Glockengeläut*. Munic.
- (1999). *El meu segle*. Barcelona. [Trad. Pilar Estelrich i Arce]
- (1999). *Mein Jahrhundert*. Göttingen.

- GRASS, Günter (1999). *Continuará...: Discurso de Günter Grass con motivo de la concesión del Premio Nobel de Literatura 1999*. El País Digital, núm. 1314 (8 diciembre). [Trad. de Miguel Sáenz]
- GÖRTZ, Franz Josef [ed.] (1984). *Günter Grass: Anknüpfung für Leser*. Darmstadt: Neuwied.
- LUDWIG, Arnold Heinz [ed.] (1995). *Kritisches Lexikon zur deutschsprachigen Gegenwartsliteratur*. Múnic.
- NEUHAUS, Volker (1992 [1979]). *Günter Grass*. Stuttgart.

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 1999
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE QUÍMICA
CONCEDIT A
AHMED ZEWAIL.
A CÀRREC DE
JOSEP M. LLUCH
DE LA UNIVERSITAT
AUTÒNOMA
DE BARCELONA**

EN EL LÍMIT DE L'ESCALA DE TEMPS DE LA QUÍMICA:
FEMTOQUÍMICA. LA DINÀMICA ULTRARÀPIDA DE L'ENLLAÇ
QUÍMIC

L'Acadèmia Sueca de Ciències ha concedit el Premi Nobel de Química corresponent a l'any 1999 al professor Ahmed H. Zewail. Zewail nasqué l'any 1946 a Egipte, on és extraordinàriament popular com mostra el fet que l'any 1998 ja tenia diversos segells de correus emesos en el seu honor. Actualment és ciutadà egipci i nord-americà, i treballa a Caltech (Institut de Tecnologia de Califòrnia, Pasadena, Califòrnia, Estats Units), on ocupa la Càtedra Linus Pauling de Química Física.

La citació de l'Acadèmia Sueca diu, segons traducció literal de l'anglès, «pels seus estudis dels estats de transició de les reaccions químiques mitjançant l'espectroscòpia de femtosegon». Aquestes són les paraules que, a partir d'ara, quedaran oficialment lligades a qualsevol esment que en el futur es faci del Premi Nobel de Química de l'any 1999. En altres termes, Zewail ha aconseguit portar els experiments al límit de l'escala de temps de la química, cosa que fa que el puguem considerar com el pare de la femtoquímica o dinàmica ultraràpida de l'enllaç químic. Puix que el premi no se li ha atorgat per cap de les moltes aplicacions concretes que ha fet, sinó pel seu treball pioner desenvolupant una tècnica experimental ultraràpida per seguir a temps real el progrés d'una reacció química, es fa més difícil explicar l'aportació de Zewail de forma comprensible per als no especialistes. Per a això, en primer lloc, faré una aproximació, en part històrica, al problema general que Zewail ha tractat de solucionar i, en segon lloc, presentaré un seguit d'aplicacions a diferents tipus de reaccions que han estat estudiades pel grup de Zewail a Caltech. En alguns punts es farà necessari un cert sacrifici del rigor en benefici de la claredat de l'exposició.

Una molècula està formada per un conjunt de nuclis atòmics (carregats positivament) immersos dins un «mar» d'electrons (carregues negatives), els quals estan deslocalitzats al voltant dels nuclis d'acord amb la corresponent funció d'ona

electrònica de la molècula. Les interaccions electrostàtiques entre les partícules carregades són la causa fonamental de la cohesió de les molècules. La posició relativa dels nuclis (la configuració nuclear) i la distribució dels electrons entre aquests nuclis determinen el conjunt d'enllaços de la molècula. D'altra banda, les molècules no són entitats estàtiques, sinó que estan en moviment continu: tenen 3 graus de llibertat de translació, 3 de rotació (només 2 si la molècula és lineal) i $3N-6$ de vibració ($3N-5$ si la molècula és lineal), essent N el nombre de nuclis de la molècula. Durant una reacció química es produeix una reorganització dels enllaços entre els nuclis de la molècula o molècules, de manera que alguns es trenquen i/o d'altres es formen. Per exemple, en una reacció bimolecular elemental, és a dir, una reacció en la qual la molècula (o molècules) del producte (o productes) es formen directament com a resultat de la col·lisió entre les dues molècules de reactius, tal com



43

el nombre i tipus de nuclis són els mateixos a reactius i a productes, però la distribució dels enllaços entre ells ha canviat. El problema rau a saber com es produeix aquesta reorganització dels enllaços químics i quan de temps requereix (és a dir, amb quina velocitat té lloc la reacció). En el cas de la reacció de l'equació 1, la velocitat de la reacció, mesurada com el nombre de molècules de producte que es formen per unitat de volum i de temps,

$$v = k(T) [A] [B] \quad [2]$$

és directament proporcional a la concentració d'ambdós reactius i a l'anomenada *constant de velocitat de la reacció*, la qual depèn de la temperatura.

La primera descripció de com varia la velocitat d'una reacció química amb la temperatura es deu a Arrhenius (Premi Nobel de Química de 1903) qui, ja a finals del segle XIX, l'any 1889, basant-se en nombroses mesures experimentals i seguint el

treball previ de Van't Hoff (el qual va rebre el primer Premi Nobel de Química l'any 1901), va formular l'equació que porta el seu nom

$$k(T) = A e^{-E_a/RT} \quad [3]$$

on E_a , l'energia d'activació, es pot interpretar com l'energia mitjana del parell de molècules A i B en el conjunt de les col·lisions reactives (les quals porten a la formació dels productes) menys l'energia mitjana del total de les col·lisions, siguin o no reactives. En altres paraules, E_a és una mesura de la quantitat d'energia que s'ha de proporcionar als reactius per tal que puguin reorganitzar-se i donar els productes.

L'equació d'Arrhenius, una equació macroscòpica i estrictament experimental, és probablement l'equació més important de la cinètica química, és a dir, de la branca de la química que dóna una descripció macroscòpica (o molar) de l'evolució d'una reacció química al llarg del temps. No obstant això, no proporciona una detallada descripció molecular del curs d'una reacció, ja que la constant de velocitat $k(T)$ és el resultat de fer la mitjana d'un nombre enormement gran (de l'ordre de 10^{23}) de col·lisions de característiques molt diferents. Per tal d'entendre quins són els factors que determinen el valor de la $k(T)$ i, per tant, de la velocitat d'una reacció química hem d'entrar en el camp de la dinàmica molecular de les reaccions químiques, la qual aporta una descripció microscòpica (a escala molecular) d'una reacció química, de manera que permet de seguir el curs d'una única col·lisió individual. Dit en altres termes, la cinètica es limita a mesurar el *nombre* de molècules de producte (un nombre que pot ser de l'ordre de 10^{23}) que es formen per unitat de temps, per exemple, per segon, mentre que la dinàmica estudia *com* té lloc pas a pas cadascuna de les col·lisions. Evidentment, almenys en teoria, de la informació que s'obté mitjançant la dinàmica es pot calcular qualsevol propietat cinètica: sabent com té lloc cada col·lisió individual, es poden obtenir les magnituds cinètiques macroscòpiques com a resultat de fer la

mitjana d'un nombre enorme de col·lisions moleculars. L'objectiu de la dinàmica, per exemple, per a una reacció bimolecular elemental que dona dues molècules de producte és, doncs, descriure en funció del temps com les dues molècules de reactius s'apropen, col·lisionen, intercanvien energia, algunes vegades es trenquen enllaços i/o se'n formen de nous i, finalment, se separen i donen els productes si la col·lisió ha estat reactiva, o bé regeneren els reactius si la col·lisió ha resultat que és no reactiva.

Mentre que, com és natural en tractar-se d'un enfocament macroscòpic, en el camp de la cinètica l'experiment ha anat sempre per davant de la teoria, en el camp de la dinàmica, un tractament microscòpic, la situació ha estat inversa. Ja l'any 1935 les contribucions de diversos autors varen conduir a la teoria de l'estat de transició, una aproximació estadística a la dinàmica. Des d'aleshores aquesta teoria ha rebut successives millores (per la qual cosa s'ha complicat progressivament), de manera que ha esdevingut probablement la teoria més útil i estesa en el camp de la química, no sols per la seva capacitat de predir quantitativament amb una precisió raonable la velocitat de les reaccions químiques (amb molta precisió en el cas de reaccions en fase gas incloent-hi fins a 10-15 nuclis), sinó també per proporcionar un marc de treball qualitatiu mitjançant el qual es poden entendre millor la totalitat de les reaccions químiques. La teoria de l'estat de transició, igual que l'equació d'Arrhenius, dona una expressió de la constant de velocitat (una magnitud macroscòpica), però ara ja a partir de magnituds moleculars. Aquesta teoria es basa en el concepte d'estat de transició, un conjunt de configuracions de la totalitat dels nuclis que intervien a la reacció, a mig camí entre les dels reactius i les dels productes, que normalment tenen més energia potencial (vegeu més avall) que els reactius o els productes, i que constitueixen el coll d'ampolla dinàmic de la reacció. És a dir, qualsevol parell de molècules *A* i *B* que aconseguixin arribar a una configuració nuclear que pertanyi a l'estat de transició de la reacció, s'assumeix que evolucionaran

directament cap als productes. La reacció serà més ràpida com més fàcil sigui d'assolir les configuracions nuclears que corresponen a l'estat de transició. L'equació que dona la constant de velocitat és

$$k(T) = Lf \frac{k_B T}{h} \frac{q_{\ddagger}}{q_A q_B} e^{-\frac{E_0}{k_B T}} \quad [4]$$

on L és el nombre d'Avogadro, f el volum, k_B la constant de Boltzmann, T la temperatura absoluta, h la constant de Planck, les q són les funcions de partició de l'estat de transició (ET) i dels reactius A i B (funcions que depenen dels estats translacionals, rotacionals, vibracionals i electrònics de les diferents espècies) i E_0 és la diferència d'energia entre els nivells més baixos de l'estat de transició i dels reactius.

Puix que la teoria de l'estat de transició no tracta explícitament cada col·lisió individual, estrictament no és una autèntica teoria dinàmica. Dins del camp teòric, l'estudi dinàmic rigorós, la dinàmica quàntica, passa per resoldre l'equació de Schrödinger dependent del temps

$$i \hbar \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} = H \Psi(t) \quad [5]$$

on H és l'operador hamiltonià del sistema molecular i $\Psi(t)$ és la funció d'ona, la qual proporciona una descripció completa de la dinàmica al llarg de la col·lisió. Així es pot tractar teòricament cada col·lisió individual, encara que, malauradament, els càlculs no són practicables per a reaccions amb més de quatre nuclis si tots els graus de llibertat es tracten explícitament. Existeixen simplificacions de l'estricta tractament quàntic com la dinàmica semiclàssica o la dinàmica quasiclàssica. D'una o altra forma, es pot tractar amb cert detall cadascuna de les col·lisions (amb certes limitacions dependent del nombre de nuclis que intervinguin a la reacció), però, al contrari de la teoria de l'estat de transició, per a una reacció química ordinària resulta pràcticament impossible fer la mitjana d'un nombre molt elevat de col·lisions per tal d'obtenir un valor raonable de la constant de velocitat $k(T)$.

En aquest punt s'ha de remarcar que tots els tractaments teòrics que pretenen d'estudiar la dinàmica d'una reacció química fan servir el concepte de *superfície d'energia potencial*. Preci­ sament, el Premi Nobel de Química de l'any 1998 va ser atorgat «a Walter Kohn pel seu desenvolupament de la teoria del funcio­ nal de la densitat i a John Pople pel seu desenvolupament dels mètodes computacionals en química quàntica». Els treballs de Kohn i Pople permeten de resoldre l'equació de Schrödinger electrònica d'un sistema molecular, de tal forma que, aplicats a una reacció química, permeten el càlcul de la superfície d'ener­ gia potencial de la reacció.

Convé introduir aquí el terme *supermolècula*. En una reacció bimolecular entre les molècules *A* i *B*, per donar la molè­ cula producte *P* (o les molècules producte *C* i *D*), les molècules *A* i *B* inicialment estan molt allunyades entre si, de manera que existeixen com a molècules individuals. És a dir, la interacció entre ambdues és pràcticament nul·la: la molècula *A* no nota en absolut la presència (allunyada) de la molècula *B*, i a l'inrevés. No obstant això, a mesura que s'acosten, es pertorben mútua­ ment: sota la influència de la molècula *B*, la molècula *A* ja és diferent d'aquella entitat individualitzada que era a distància infinita de *B*, i viceversa. Ja no es pot parlar de la molècula indi­ vidual *A* i de les seves magnituds particulars (i el mateix per a la molècula *B*). Més aviat parlem de la supermolècula o molècula com a resultat de considerar com un tot el conjunt de les molè­ cules *A* i *B*. Així, durant tota la col·lisió el conjunt de nuclis i electrons que intervenen en la reacció química formen una supermolècula, de manera que si la col·lisió resulta que és reac­ tiva donarà origen a la molècula producte *P* (o a les molècules producte *C* i *D*, un cop ambdues al seu torn s'hagin allunyat suficientment entre si). Naturalment, en una reacció unimolecu­ lar la supermolècula coincideix amb l'única molècula de reactiu. Amb aquesta definició prèvia, cadascuna de les configuracions nuclears del conjunt de nuclis que intervenen en una reacció quí­ mica (és a dir, de la supermolècula) té associada una energia potencial, que és l'energia total de la supermolècula suposant

que els nuclis estiguin en repòs en aquella configuració nuclear. És a dir, inclou les energies potencials de repulsió electró-electró i nucli-nucli, l'energia potencial d'atracció nucli-electró (les tres de caràcter electrostàtic) i l'energia cinètica dels electrons, però no inclou l'energia cinètica dels nuclis. L'energia potencial de cada configuració nuclear de la supermolècula com a funció de les coordenades que defineixen cadascuna d'aquestes configuracions nuclears és el que s'anomena *superfície d'energia potencial*.

En una superfície d'energia potencial d'una, per exemple, reacció bimolecular elemental la configuració dels nuclis de la supermolècula que correspon als reactius *A* i *B* a distància suficientment gran com per a negligir la mútua interacció és un mínim de la superfície (excepte en la direcció corresponent a la variació de la distància *A-B*, al llarg de la qual l'energia potencial no varia). Igualment, la configuració nuclear del producte (o productes) està en un altre mínim de la superfície. Puix que tant reactius com productes són mínims d'energia potencial, són relativament estables al llarg del temps, és a dir, els costa sortir de la respectiva regió de mínim que els envolta. Aquesta estabilitat els dona un temps de vida mitjana, en general, suficientment llarg com perquè puguin ser analitzats en diversos experiments que identifiquin la seva natura i propietats. Si l'estabilitat és prou gran, els reactius i els productes es poden caracteritzar sense problemes, fins i tot amb mètodes químics clàssics d'anàlisi: en canvi, si són poc estables viuen poc temps, per la qual cosa s'han d'identificar amb mètodes físics ràpids, com els espectroscòpics. Els mínims d'energia potencial corresponents a reactius i productes estan evidentment a regions diferents de la superfície d'energia potencial, més allunyades com més difereixen geomètricament els productes dels reactius. De fet, la reacció química consisteix en l'evolució de la corresponent supermolècula des de la regió de mínima energia potencial associada als reactius fins a la regió associada als productes. Però per a sortir d'un mínim l'energia potencial ha d'augmentar, per la qual cosa, normalment, els reactius estan separats dels productes per una regió

d'alta energia potencial de la superfície, que és precisament la regió de configuracions nuclears de la supermolècula que envolten l'estat de transició de la reacció. Fent un símil geogràfic, la reacció suposa el pas des de la vall de reactius fins a la vall de productes, que estan separats per muntanyes (la regió de l'estat de transició). Evidentment, a la regió de les muntanyes d'energia potencial hi haurà, almenys, una collada: com més baixa (menys energia potencial) i més ampla sigui la collada, més ràpida serà la reacció química.

És evident, doncs, que la forma i la velocitat amb les quals té lloc la reacció química depenen de la regió de la superfície d'energia potencial que separa els reactius dels productes. Durant una col·lisió entre les molècules *A* i *B*, la supermolècula es passeja per aquesta regió. Si aconsegueix travessar-la serà una col·lisió reactiva. El problema rau en què en aquesta regió d'alta energia potencial el temps de residència de la supermolècula és molt petit, per la qual cosa no existien tècniques experimentals suficientment ràpides per a explorar aquestes configuracions extraordinàriament inestables. Per tant, fins fa molt poc, la dinàmica molecular de les reaccions químiques era un camp al qual només s'hi podia accedir des de la teoria. L'aportació de Zewail, com queda recollit a la citació de l'Acadèmia Sueca, ha fet possible que la regió de la superfície d'energia potencial que determina la dinàmica pugui també ser explorada amb tècniques experimentals ultraràpides a temps real.

La tècnica experimental bàsica, de la qual la femtoquímica n'és la versió més avançada, és la fotòlisi de flaix, desenvolupada l'any 1949 per Norrish i Porter a Cambridge (Anglaterra), els quals varen ser guardonats per això amb el Premi Nobel de Química de l'any 1967 (compartit amb Eigen pel seu mètode cinètic de relaxació). La fotòlisi de flaix va néixer per tal de fer estudis cinètics en reaccions extremadament ràpides per a les quals la velocitat de formació del producte és tan gran que les tècniques convencionals són massa lentes per mesurar el nombre de molècules de producte que es formen per unitat de temps. Els primers experiments varen permetre fer mesures dins

Escala de temps del mil·l·segon (10^{-3} s) i ja al mateix any 1949 es va arribar al microsegon (10^{-6} s). L'adveniment dels primers làsers, amb la generació de polsos molt intensos i extremadament curts, va permetre un enorme salt qualitatiu en la capacitat de la fotòlisi de flaix per seguir la cinètica de reaccions cada vegada més ràpides. Així, als anys seixanta es podien ja mesurar reaccions dins l'escala de temps del nanosegon ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ s) i als anys setanta varen aconseguir arribar a l'escala del picosegon ($1 \text{ ps} = 10^{-12}$ s). Malgrat que aquests intervals de temps semblen sorprenentment breus (i de fet ho són, especialment en comparació amb la nostra experiència diària en el món macroscòpic), són encara massa grans per poder fer mesures dinàmiques. Així, fins al picosegon encara estem limitats a mesures cinètiques, de reaccions molt ràpides, però mesures cinètiques (nombre de productes formats per unitat de temps) al cap i a la fi! Alguns números ajuden a veure clar aquest fet. Una velocitat típica de moviment dels nuclis és entre 10^4 i 10^5 cm/s. El trajecte complet des dels reactius fins als productes durant una col·lisió (en una reacció bimolecular es pot considerar que la col·lisió comença quan s'inicia la interacció entre les molècules *A* i *B*, i que acaba quan la interacció entre les molècules de producte formades torna a ser negligible, o bé, si es forma una única molècula de producte, quan aquesta arriba a la seva configuració nuclear de mínima energia) pot suposar un recorregut del voltant de 10 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m), per tant, amb una durada d'entre 1 ps i 10 ps (10^{-12} s - 10^{-11} s). Amb altres paraules, l'interval de temps dins el qual es poden observar el conjunt de configuracions nuclears de la molècula que determinen la dinàmica de la reacció és només entre 1 ps i 10 ps. Si les posicions dels nuclis es volen caracteritzar amb una resolució de 0.1 \AA , les mesures s'han de fer dins l'escala de temps compresa entre 10 fs i 100 fs (10^{-14} s - 10^{-13} s), on *fs* és el símbol de la unitat de temps anomenada *femtosegon* (10^{-15} s). Per tant, el seguiment de la dinàmica d'una reacció química requereix mesures dins l'escala de temps del femtosegon. Escalles de temps més llargues no permeten de «veure» que és el que passa durant una col·lisió. A títol de com-

paració, per a una molècula típica els períodes de rotació i de vibració són de l'ordre de 10^{-9} s - 10^{-12} s i 10^{-12} s - 10^{-14} s, respectivament.

Dues tecnologies han permès el desenvolupament de la femtoquímica: la generació i caracterització de polsos làser ultracurts i els feixos moleculars. El sistema làser construït per Zewail a Caltech es basa en el disseny pioner de Shank, qui l'any 1981 va desenvolupar un làser de colorant (un làser CPM) que per primera vegada va fer possible la generació de polsos de femtosegons en els AT&T Bell Laboratories. Concretament la durada dels primers era de 90 fs. Des d'aleshores els polsos s'han fet encara més breus: de 27 fs l'any 1985, i de 6 fs l'any 1987, que és l'actual límit, el qual correspon a un moviment nuclear de menys de 0.1 Å, que és més curt que el temps de vida de la supermolècula a la regió al voltant de l'estat de transició. D'altra banda, en un experiment simple de feixos moleculars un feix de molècules del reactiu *A* es dirigeix directament cap a un feix de molècules de l'altre reactiu *B*, de manera que es produeixen col·lisions individualitzades entre una única molècula *A* i una única molècula *B*, sense que les altres d'ambdós feixos intervinguin. El resultat de la col·lisió (una o diverses molècules de producte si la col·lisió ha estat reactiva, o els reactius de nou en cas contrari) es pot caracteritzar utilitzant els detectors adients. L'energia cinètica relativa d'aproximació entre els reactius es pot regular en aquests experiments de col·lisió única. Quan es combinen els làsers amb els experiments de feixos moleculars, el làser excita una de les molècules de reactiu, per exemple la molècula *A*, i modifica així la probabilitat de la reacció bimolecular amb la molècula *B*. Si es tracta d'una reacció unimolecular només hi ha un feix de molècules, de manera que el làser, en incidir sobre la molècula, inicia el procés unimolecular. Si s'estudia una reacció bimolecular, té lloc una col·lisió completa que es pot considerar composta de dues semicol·lisions: l'aproximació dels reactius fins a formar la supermolècula a la regió al voltant de l'estat de transició, i l'evolució d'aquesta supermolècula fins a la molècula o molècules de producte. Si es tracta d'una reacció

unimolecular induïda pel làser, és com si només s'estudiés una semicol·lisió, la que porta des de la supermolècula cap als productes.

La femtoquímica, que també es pot anomenar «la química en l'escala de temps del femtosegon», o «l'espectroscòpia de l'estat de transició de reaccions en l'escala del femtosegon» (en anglès, *FTS* o *femtosecond transition-state spectroscopy of reactions*) permet de seguir una col·lisió a temps real. La femtoquímica es pot definir com la branca de la química que està directament relacionada amb l'acte mateix de la transformació química, el procés de trencament d'un enllaç químic i/o la formació d'un altre enllaç, seguits a temps real amb una resolució espacial de l'ordre de 0.1 Å.

Quan l'any 1987 Zewail va aconseguir estudiar per primera vegada el curs d'una reacció química en l'escala de temps del femtosegon, estava inaugurant la que es podria anomenar també la «fotografia molecular en l'escala del femtosegon». Just cent anys abans va començar la fotografia d'alta velocitat. L'any 1872, l'empresari de trens Leland Stanford va apostar 25.000 \$ de l'època que un cavall al galop en algun moment de la seva marxa tenia les seves quatre peüngles en l'aire, separades del terra. Per a provar-ho va contractar al fotògraf Eadweard Muybridge, el qual, després de molts intents, va desenvolupar una càmera amb un obturador que s'obria i es tancava en només dos mil·lisegons. D'aquesta manera, l'any 1887, va distribuir dotze càmeres amb aquest temps d'exposició cada mig metre al llarg d'un camí pel qual després correria un cavall al galop. Mitjançant dispositius mecànics posats en el camí del cavall enfront de cadascuna de les càmeres, va aconseguir que l'obturador es disparés quan el cavall passava per davant de cada càmera. Tenint en compte que un cavall al galop avança a una velocitat del voltant de 10 m/s, Muybridge va obtenir un seguit de fotografies (que encara es conserven) amb una resolució espacial en cadascun de 2 cm, suficients per demostrar que Stanford havia guanyat la seva aposta, ja que en alguns dels fotografies el cavall flotava en l'aire. Des d'aleshores la fotografia d'alta velo-

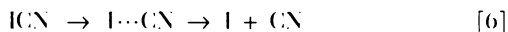
citat ha evolucionat molt, fins arribar a la fotografia molecular desenvolupada per Zewail. Per adonar-se de l'extrema brevetat d'un femtosegon només cal escriure'l amb notació decimal en unitats de segon: 0.000000000000001 s. Aquest temps d'exposició és un bilió (10^{12}) de vegades més breu que l'original de Muybridge l'any 1887 i representa una millora també d'un bilió de vegades en la resolució temporal respecte als primers experiments de fotòlisi de flaix l'any 1949.

Naturalment, una velocitat d'obturació de l'ordre dels femtosegons és impossible d'aconseguir amb cap càmera basada en dispositius mecànics o elèctrics. En què consisteix, doncs, un aparell, una càmera molecular, que permeti de fer experiments de fotòlisi de flaix en l'escala de temps del femtosegon? La idea bàsica és molt senzilla. De forma esquemàtica, un sistema làser genera un pols làser d'excitació i un pols làser de sonda ultracurts a les longituds d'ona apropiades (i que normalment seran diferents). Ambdós polsos deixen el sistema làser simultàniament, però durant el seu recorregut s'introdueix un cert endarreriment temporal en el pols de sonda. Per a aconseguir-ho, s'aprofita l'enormement gran, encara que finita, velocitat de la llum ($\sim 3 \cdot 10^{10}$ cm/s). Mitjançant desplaçaments micromètrics regulables dels miralls del sistema òptic, es desvia el pols de sonda, de manera que segueix un camí més llarg que el pols d'excitació i, per tant, arriba amb un cert retard al feix molecular. Per exemple, diferències de camí de 0.003 mm o de 0.03 mm provoquen retards de 10 fs o 100 fs, respectivament. Quan el pols d'excitació incideix sobre una molècula del feix molecular que s'origina en l'aparell de feixos, li transferix energia, l'excita i inicia la reacció química, de forma que el rellotge experimental es posa a zero. Uns pocs femtosegons després arriba a la mateixa molècula el pols de sonda, el qual pertorba la molècula i, amb un detector adient, s'analiza la resposta de la molècula a la pertorbació. Existeixen diferents esquemes de detecció, i s'utilitza el més convenient en cada cas: fluorescència induïda per làser, espectrometria de masses acoblada a la ionització multifotònica per làser, etc. Evidentment, la resposta de la molècula dependrà

de quina configuració nuclear tingui en el moment que rep el pols de sonda. Com amb les dotze càmeres de l'experiment de Muybridge, repetint l'experiment de fotòlisi de flaix per diferents retards respecte al pols d'excitació, s'obtenen successius «fotogrames» mitjançant els quals es pot seguir la dinàmica de la reacció a temps real mentre va recorrent les diferents configuracions nuclears. Naturalment no s'obtenen fotogrames que corresponguin a imatges com les que s'obtenen amb la fotografia tradicional com a resultat que la llum incideix sobre una pel·lícula química amb una emulsió fotosensible que després es revela, o com amb la moderna fotografia digital. Més aviat el «fotograma» pot consistir, per exemple, en un espectre d'excitació (cas de la detecció per fluorescència induïda per làser): a causa de la interacció amb els pols de sonda, la molècula emet radiació (fluorescència) que es recull en un fotonultiplicador i es registra en funció de la longitud d'ona del pols de sonda.

Una vegada explicats de la forma més simple possible els principis generals de la femtoquímica, en la part que segueix a continuació presentaré a títol d'exemple algunes de les aplicacions realitzades per Zewail en els darrers anys. Tenint en compte les naturals limitacions en l'extensió d'aquest capítol, aquesta segona part resultarà necessàriament més especialitzada, ja que no hi ha espai per explicar els fonaments de tots els conceptes que apareguin, a l'inrevés de la primera part, la qual he procurat que sigui el més autoconsistent possible.

La primera de les reaccions estudiades per Zewail va ser una reacció unimolecular (1987), concretament la dissociació directa del cianur de iode amb l'objectiu d'estudiar el procés de trencament d'un enllaç químic:

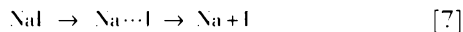


on I...CN representa el conjunt de configuracions nuclears per les quals passen el dos fragments fins a la seva dissociació completa. El procediment experimental és el següent: el pols làser d'excitació (amb una longitud d'ona $\lambda_1 = 307 \text{ nm} = 1 \text{ nm}$, nanòmetre,

$= 10^{-9}$ m) excita la molècula ICN des de l'estat electrònic fonamental (en el qual la molècula ICN és estable, ja que està en un mínim d'energia potencial) fins a un estat electrònic excitat dissociatiu (és a dir, un estat en el qual l'energia potencial baixa contínuament a mesura que l'enllaç I-CN s'allarga). Com a conseqüència, l'enllaç es trenca directament sense cap barrera d'energia potencial. El pols làser de sonda, endarrerit en un temps variable, detecta, via fluorescència induïda per làser, la formació del producte de fotofragmentació CN. Inicialment se sintonitza a una longitud d'ona corresponent al pic d'absorció del fragment CN lliure ($\lambda_2^* = 388.5$ nm). Es registra el senyal de l'espectre d'excitació a aquesta longitud d'ona en funció del temps de retard, el qual és augmentat sistemàticament. En la corba que s'obté, hi ha un període d'inducció (durant el qual el senyal de l'espectre és molt petit) corresponent al temps requerit per tal que el fragment CN s'allunyi de la influència de l'àtom de iode. Després, la corba asimptòticament arriba al seu màxim que correspon al CN lliure. El procés de trencament és molt ràpid (ja que la superfície d'energia potencial excitada en la qual té lloc la fragmentació és dissociativa) amb un temps de trencament de l'enllaç $\tau_{1/2} = 205 \pm 30$ fs ($\tau_{1/2}$ es defineix com el temps de retard pel qual ja s'arriba a la meitat del màxim del senyal de l'espectre). A continuació tot el procés es repeteix diverses vegades utilitzant polsos làser de sonda amb longituds d'ona lleugerament més grans ($\lambda_2^* = 389.7$ nm, 389.8 nm, 390.4 nm i 391.4 nm), les quals corresponen a les absorcions associades a les configuracions nuclears de les espècies I-CN. Per a cadascuna de les longituds d'ona s'obté una corba que representa el corresponent senyal de l'espectre d'excitació en funció del temps de retard. Totes aquestes corbes són primer creixents, passen per un màxim i després decreixen fins a arribar asimptòticament a un nivell constant que depèn de λ_2^* . El màxim apareix a temps de retard més grans a mesura que la longitud d'ona decreix. La pujada i posterior baixada de cada corba requereix al voltant de 100 fs, un temps característic d'espècies de molt curta vida que només existeixen en el breu camí entre reactius i productes. De fet, cada corba representa la

formació i destrucció de les espècies I-CN dins diferents intervals de distàncies I-C. Cada màxim indica la distància I-C més probable per al corresponent temps de retard. Naturalment els màxims es desplacen cap a distàncies I-C més grans a mesura que el temps de retard augmenta, fet que indica l'evolució dinàmica de la dissociació des de reactius fins a productes.

La molècula de cianur de iode, una vegada excitada, fragmenta molt ràpidament ja que evoluciona sobre una superfície dissociativa amb un únic grau de llibertat rellevant (la distància I-C). Però en casos més complicats, per exemple, si la superfície d'energia potencial tingués un mínim en el camí de trencament o si hi hagués més d'un grau de llibertat involucrat, la supermolècula podria quedar atrapada durant un cert temps. Així, el sistema podria tenir característiques del que s'anomena un *estat quasilligat* o *ressonància*. En aquest cas, la formació dels productes de la fragmentació seria més lenta i podrien aparèixer oscil·lacions que reflectissin la freqüència de ressonància vibracional del paquet d'ones dels fragments que es dissocien. Un exemple de reacció unimolecular d'aquest tipus és la dissociació d'un halur alcalí, concretament del iodur de sodi

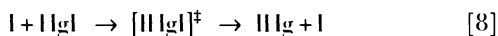


El parell d'àtoms que intervien en aquesta reacció poden ser àtoms neutres (Na i I) o bé un parell de ions (Na^+ i I^-). En el primer cas formen una estructura covalent i en el segon una estructura iònica. Quina de les dues és la més estable, depèn de la distància d'enllaç. A distàncies curtes l'estructura iònica és més estable (distància d'equilibri $\cong 2.7 \text{ \AA}$), però la covalent té menys energia potencial a distàncies llargues (ja que el potencial d'ionització del Na és més alt que l'electroafinitat del iode). Dit amb altres paraules, la corba diabàtica iònica és la de menys energia potencial a distàncies curtes, però es creua a 6.93 \AA amb la corba diabàtica covalent. Aquestes característiques donen lloc a dos estats electrònics adiabàtics. L'estat fonamental és iònic a distàncies curtes (per tant, la molècula és iònica en el seu estat

fonamental: $\text{Na}^+ \text{F}$), però covalent a distàncies llargues, per la qual cosa es dissocia donant els àtoms neutres. El primer estat excitat és covalent a distàncies curtes, però iònic a distàncies llargues. En la zona d'encreuament, ambdós estats adiabàtics són una barreja de les contribucions iònica i covalent. En l'experiment de femtoquímica, el pols làser d'excitació (amb $\lambda_1 = 310$ nm) porta la molècula des de l'estat fonamental fins al primer excitat, el qual, a aquestes distàncies és covalent. A partir d'aquí el seguiment de la dinàmica del trencament se segueix amb polsos làser de sonda amb λ_2^* corresponents a l'estructura covalent a distàncies curtes i amb $\lambda_2^x = 589$ nm que correspon al Na lliure. Quan el paquet d'ones de la supermolècula covalent segueix la seva evolució dinàmica sobre la superfície corresponent al primer estat adiabàtic excitat, de manera que la distància internuclear augmenta progressivament, en arribar a les proximitats de la zona d'encreuament es bifurca: part del paquet, sense cap barrera d'energia potencial, salta cap a l'estat adiabàtic fonamental (o sigui, es manté en la corba diabàtica covalent) i produeix la dissociació en els àtoms neutres, i part del paquet d'ones queda atrapat en l'estat adiabàtic excitat, on troba una barrera d'energia potencial que el fa rebotar cap a distàncies més curtes, des d'on tornarà a rebotar cap a la zona d'encreuament perquè repeteixi el procés diverses vegades. Amb altres paraules, quan la supermolècula arriba a la zona d'encreuament té una certa probabilitat de dissociar-se i una certa probabilitat de rebotar. Aquesta predicció teòrica ha estat confirmada pels experiments de Zewail. Amb el pols làser de sonda corresponent a λ_2^* , el senyal que indica la presència de la supermolècula covalent a distàncies curtes mostra un clar comportament oscil·latori en funció del temps de retard, amb un període de 1.25 ps. Aquest temps entre pics és el que triga la supermolècula a arribar a la zona d'encreuament i tornar de rebot a la situació covalent de sortida. Però cada vegada que arriba a la zona d'encreuament hi ha una certa probabilitat que es dissociï, de manera que l'alçada dels successius pics va baixant a cada rebot. Així, el moviment oscil·latori del senyal corresponent a la super-

molècula covalent només persisteix durant 10 oscil·lacions, la qual cosa indica que la probabilitat de dissociació quan s'arriba a la zona d'encreuament és de 0.1. És com si la supermolècula de NaI oscil·lés dins el pou de potencial del primer estat adiabàtic excitat i en arribar a l'encreuament alliberés amb una certa probabilitat polsos d'àtoms de Na. Efectivament, amb el pols làser de sonda corresponent a λ_2^z , el senyal que indica la presència de Na lliure mostra una pujada amb esglaons periòdics (evidentment amb el mateix període de 1.25 ps).

El problema següent va ser l'estudi d'una reacció amb barrera d'energia potencial i, per tant, amb estat de transició: es tractava d'observar l'evolució dinàmica a temps real des de l'estat de transició fins als productes. Concretament Zewail va escollir la reacció

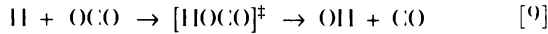


58

on $[IHgI]^\ddagger$ representa l'estat de transició de la reacció. Per a estudiar l'evolució temporal des de l'estat de transició s'ha de partir d'aquest i seguir la semicol·lisió $[IHgI]^\ddagger \rightarrow Hg + I$. Per a generar l'estat de transició es parteix del iodur de Hg(II), que en el seu estat electrònic fonamental és una estructura estable dins un mínim d'energia potencial, i amb un pols làser d'excitació ($\lambda_1 = 310$ nm) s'arriba a $[IHgI]^\ddagger$. El pols làser de sonda té una longitud d'ona $\lambda_2^z = 390$ nm, que correspon al fragment Hg lliure. L'experiment de femtoquímica mostra que el temps de dissociació de l'estat de transició per arribar a Hg lliure és ~ 300 fs. A més, s'observen els moviments vibracional (~ 300 fs) i rotacional (~ 1.3 ps) del Hg naixent a mesura que la semicol·lisió avança.

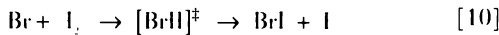
Les reaccions bimoleculares són més problemàtiques que les unimoleculares. En una reacció unimolecular, l'origen de temps queda ben establert pel pols làser d'excitació. Però en una reacció bimolecular establir el moment inicial de la reacció no és tan fàcil. Abans que comenci la col·lisió entre ambdues molècules de reactiu, s'han de trobar l'una a l'altra, la qual cosa pot suposar un temps entre els nanosegons i els microsegons. El

temps entre col·lisions dóna una incertesa tan gran que, en principi, fa impossible fer mesures dinàmiques en l'escala del femtosegon o del picosegon. Una possibilitat és generar l'estat de transició promocionant a un estat excitat, com en el cas del HIgl . Una altra possibilitat, que no requereix sortir de l'estat fonamental, és utilitzar un feix de molècules precursors que continguin ja els potencials reactius molt propers l'un de l'altre, per exemple, mitjançant un pont d'hidrogen. Així, Zewail va estudiar la reacció bimolecular



La molècula precursora és $\text{H}\cdots\text{OCO}$, formada a partir de HI i CO_2 . El pols làser d'excitació inicia el procés fotodissociant l'enllaç I-H i emetent un àtom d'hidrogen translacionalment calent en la direcció del nucli d'oxigen amb el qual estava formant un pont d'hidrogen. Així es forma la supermolècula que reuneix els quatre nuclis de l'equació [9]. El pols làser de sonda té una longitud d'ona corresponent al radical OH lliure. L'experiment mostra que el temps de vida de la supermolècula és de l'ordre d'1 ps, un temps de vida relativament llarg que indica que la reacció no és directa, sinó que probablement passa per un mínim d'energia potencial en el seu camí cap als productes.

La reacció de bescanvi

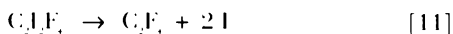


s'ha estudiat de forma similar a l'anterior, partint del complex de van der Waals $\text{HBr} \cdot \text{I}_2$ com a precursor. El pols làser d'excitació trenca l'enllaç H-Br i permet la formació de la supermolècula corresponent a la reacció [10]. El pols làser de sonda se simultantza per detectar el producte BrI . En aquest cas la supermolècula viu desenes de picosegons, cosa que indica que la supermolècula és estable dins l'escala del picosegon, probablement perquè queda atrapada dins un mínim d'energia potencial.

Una de les reaccions més estudiades en els darrers cent

anys, tant des del punt de vista teòric com experimental, és l'obertura de l'anell de ciclobutà per a donar dues molècules d'etilè i la corresponent reacció inversa de cicloaddició. El problema rau en si la reacció té lloc de forma concertada (amb un únic estat de transició) o en dues etapes (així incloent-hi un intermedi: el diradical tetrametilè). Utilitzant ciclopentanona com a precursor, el pols làser d'excitació provoca l'eliminació de CO (s'elimina en menys de 100 fs) i la formació del diradical tetrametilè. L'evolució dinàmica del qual se segueix per espectrometria de masses. El temps de vida del diradical (quasi 1 ps) indica que es tracta d'un autèntic intermedi més que d'un estat de transició (si el tetrametilè fos un estat de transició viuria menys de 100 fs). La reacció, per tant, té lloc en dues etapes.

Un problema relativament similar és l'eliminació de dos àtoms de iode del tetrafluorodiiodoetà per donar tetrafluoroetilè



60

En la molècula original, els dos enllaços C-I són equivalents, però l'experiment de femtoquímica mostra que la doble eliminació és en dues etapes i en dues escales de temps molt diferents: el primer trencament C-I triga 200 fs i dona lloc a un intermedi que necessita 25 ps per eliminar el segon àtom de iode.

Per acabar la llista d'exemples de reaccions estudiades per Zewail esmentaré dos sistemes clarament més grans que els exposats fins aquí. En primer lloc, transferències protòniques intramoleculares en un model del DNA. Les transferències protòniques que sota irradiació tenen lloc al llarg dels ponts d'hidrogen paral·lels, que mantenen unides les dues cadenes del DNA, poden ser la causa de mutacions genètiques. L'estudi directe d'aquests processos en el DNA és molt difícil i per això s'utilitza el dímer de la 7-azaindole, que conté dos ponts d'hidrogen intramoleculares com a model. Després del pols làser d'excitació ($\lambda_1 = 305\text{-}310\text{ nm}$) que porta el dímer fins al primer estat electrònic excitat, el pols de sonda ($\lambda_2^* \cong 620\text{ nm}$) permet de seguir la tau-

tomerització per espectrometria de masses. Es troba que la doble transferència protònica té lloc seqüencialment en dues etapes. La primera etapa té lloc en una escala de temps de pocs centenars de femtosegons, mentre que la segona transferència per formar el tautòmer final és molt més lenta i aquesta fase necessita alguns picosegons (el valors concrets varien segons les condicions energètiques amb les quals es fan els experiments). Quan els dos hidrògens que es transfereixen se substitueixen isotòpicament per dos deuteris, les dues etapes s'alenteixen extraordinàriament, la qual cosa indica la importància de l'efecte túnel.

D'altra banda, l'efecte que un entorn supramolecular pot tenir sobre una transferència protònica intramolecular fotoinduída es pot veure fent experiments de femtoquímica en sistemes confinats dins de nanocavitats. En concret, Zewail ha estudiat la transferència protònica intramolecular fotoinduída en el 2-(2'-hidroxifenil)-4-metiloxazolè. Els resultats mostren que en un dissolvent apròtic la transferència té lloc en molt menys de 300 fs, mentre que dins una cavitat formada per una β -ciclodextrina (amb un diàmetre de quasi 8 Å) s'alenteix fins a l'escala de temps del subpicosegon.

Actualment la femtoquímica s'aplica a tot tipus de reaccions i fenòmens que tenen lloc en fases molt diverses: feixos moleculars, clústers, gasos, líquids, superfícies i sòlids. És particularment interessant la seva aplicació a sistemes biològics per tractar d'estudiar processos fotoinduíts molt importants com, per exemple, la fotosíntesi i el mecanisme de la visió. Aquestes i altres aplicacions ja constitueixen el que es comença a anomenar *femtobiologia*.

La quantitat de nous esquemes experimentals que s'estan desenvolupant per seguir la dinàmica de les reaccions químiques dins les idees bàsiques de la femtoquímica és impressionant, i estan obrint un cúmul de noves oportunitats de recerca en molts camps, la qual cosa a la llarga es traduirà en noves aplicacions pràctiques. A continuació, molt breument, esmentaré alguns dels desenvolupaments recents.

A causa de les seves propietats ondulatòries, els electrons donen lloc a efectes de difracció quan són dispersats per la superfície d'un cristall o, fins i tot, per les molècules d'un gas. Una petita fracció del total dels electrons experimenta una dispersió elàstica. Per raó de les interferències que es produeixen entre les seves ones associades, aquests electrons difractats es concentren al llarg de direccions específiques, i donen lloc a un patró de difracció que es manifesta en forma de punts, per exemple, sobre una pantalla fluorescent. L'anàlisi d'aquest patró de difracció dóna una informació estructural molt important i, en el cas de les molècules, permet de deduir el conjunt de distàncies internuclears de la molècula, o sigui la geometria molecular. Aquesta és l'aplicació tradicional, estàtica, de la difracció d'electrons. No obstant això, Zewail ha desenvolupat una nova tècnica que es pot anomenar «difracció electrònica ultraràpida» o «femtoquímica estructural» o «difracció de l'estat de transició en l'escala del femtosegon», i que bàsicament consisteix en substituir el pols làser de sonda òptic per un pols ultracurt d'electrons. D'aquesta manera, es pot seguir el canvi de les distàncies internuclears de la supermolècula en el seu camí des de reactius fins a productes dins l'escala de temps del femtosegon. El dispositiu experimental produeix el pols làser d'excitació i el pols làser de sonda, el qual incideix sobre un fotocàtode que crea, a causa de l'efecte fotoelèctric, un pols ultracurt d'electrons. Si es canvia el temps de retard d'arribada a la mostra del pols d'electrons respecte al pols d'excitació, s'obtenen patrons de difracció en funció aquest temps de retard. D'altra banda, variacions sobre la mateixa idea condueixen al que es pot anomenar «fentomicroscopi electrònic» i, en particular, al «fentomicroscopi d'efecte túnel en el camp de la femtoquímica de superfícies».

Un altre camp que s'ha de seguir atentament en el futur per les seves immenses possibilitats és el control de les reaccions químiques mitjançant polsos làser de femtosegon. En aquest sentit, els primers experiments ja indiquen que és possible, almenys en alguns casos senzills, influir en el curs d'una reacció química utilitzant aquests polsos ultracurts, de manera que es

podria afavorir o no la formació del producte i, fins i tot, afavorir la formació d'un determinat producte davant d'altres.

Per concloure s'ha de dir que, malgrat tot el treball ja fet per Zewail i molts altres grups de recerca en el món, la femtoquímica és una branca de la química que tot just està començant. Els nous desenvolupaments experimentals en aquest camp amb estreta interrelació amb els tractaments teòrics, que estan en contínua progressió, faran que el rang de possibles aplicacions futures de la femtoquímica sigui pràcticament il·limitat.



**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 1999
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE FÍSICA
CONCEDIT A
GERARDUS'T HOOFT I
MARTINUS J. G. VELTMAN.
A CÀRREG DE
DOMÈNEC ESPRIU.
DE LA UNIVERSITAT
DE BARCELONA**

El proppassat dia 13 d'octubre els lectors habituals de la premsa podien llegir el titular següent en un diari de difusió a tot l'Estat: «La base matemàtica de las fuerzas fundamentales merece el Nobel de Física» (*El País*, 13.10.1999). No deixa de ser significatiu que aquesta notícia no aparegués fins a la pàgina 36, dins la secció anomenada *Sociedad*. Mentre escric aquestes línies, observo la portada de *La Vanguardia* (30.10.1929), una còpia facsimil de la qual embelleix el meu despatx a la universitat, on es pot veure Einstein adreçant-se per ràdio a Edison. Clarament, quan la ciència (o millor les conseqüències tecnològiques d'aquesta) s'ha fet present a tots els aspectes de la nostra vida de cada dia, la societat ha perdut en bona mesura la curiositat, l'interès, fins i tot dirien alguns el respecte reverencial, evidenciats per la vella portada de *La Vanguardia*. Esbrinar les causes d'aquest procés és segurament una feina apassionant per a científics i sociòlegs.

L'Acadèmia Sueca de Ciències en la seva nota de premsa del dia 12 d'octubre recollia, en efecte, la concessió conjunta als professors Gerard't Hooft i Tini Veltman (ambdós holandesos) del Premi Nobel de Física 1999 per «il·luminar l'estructura quàntica de les interaccions electrofebles a la física», i afegia com a explicació d'aquesta citació: «Els dos investigadors han estat premiats amb el Premi Nobel per haver col·locat la física de partícules sobre una base matemàtica més ferma. En particular han demostrat com la teoria pot emprar-se per a càlculs precisos de magnituds físiques. Experiments en acceleradors tant a Europa com als EUA han confirmat recentment molts dels resultats calculats».

La citació ens parla per tant de la naturalesa quàntica de les interaccions electrofebles, mentre que l'explicació afegida ens dóna a entendre, més aviat, que es tracta d'un treball tècnic («[...] una base matemàtica més ferma [...]», «[...] com la teoria pot emprar-se [...]»). En realitat, les dues explicacions són

correctes: posar de relleu la naturalesa quàntica de les interaccions febles ha estat possible únicament quan unes certes i sofisticades tècniques matemàtiques han estat inventades i emprades. La meua feina és explicar aquestes tècniques i el que podem aprendre'n de la manera més planera possible.

Aquest any 2000 fa cent anys d'una proposta revolucionària. Max Planck proposava el desembre de 1900 la seva hipòtesi del quàntum. Segons aquesta hipòtesi, l'energia present en la radiació del cos negre (un gas de fotons en equilibri tèrmic, diríem avui) està quantitzada. Els valors permissibles són $E = h\nu$, on ν és precisament la freqüència de la radiació i h és una constant universal que avui coneixem justament com a *constant de Planck*. És, per tant, molt adient que un segle després (un segle de sorpreses quàntiques, diuen alguns) d'aquesta proposta revolucionària, l'Acadèmia Suèca hagi premiat amb el seu guardó el treball que ha permès posar de manifest els subtils efectes quàntics a la mateixa frontera de la física d'altres energies, a les escales més petites mai explorades.

Comencem, doncs, el nostre viatge per aquest món fascinant. Hem dividit la nostra aventura en cinc apartats. El primer comença en els gloriosos anys deu i vint, quan la física va experimentar una revolució conceptual que va sacsejar la nostra manera d'entendre el món.

67

DIRAC, FEYNMAN I LES ANTIPARTÍCULES

El primer dia de classe de l'assignatura de mecànica quàntica, els alumnes de la carrera de física veuen un dibuix a la pissarra. Una font, la intensitat de la qual podem regular, emet electrons. A l'altre extrem, una placa fotogràfica recull els impactes. Al mig, una pantalla presenta dues escaletxes. Els electrons, d'energia i moment ben definits (*monocromàtics*, en diuen els físics) emesos per la font per tal d'arribar a la pantalla, on són detectats, han de passar necessàriament o bé per l'escaletxa de dalt, o bé per l'escaletxa de baix. O no?

Si així fos, a la pantalla fotogràfica hi trobaríem dues taques corresponents als electrons que passen per l'esclatxa superior, una, i als electrons que passen per l'esclatxa inferior, l'altra. Al contrari, si en lloc d'electrons la font emetés llum, trobaríem, en les condicions experimentals adequades (quan l'amplada de l'esclatxa és molt menor o comparable a la longitud d'ona de la llum), el fenomen ben conegut de les franges de difracció: l'amplitud de les ones se suma i en algunes zones es produeix un reforçament (interferència constructiva), i en altres la fase és tal que l'amplitud s'anul·la (interferència destructiva). Doncs bé, quan l'experiment es fa amb electrons, i de nou si s'hi donen les condicions experimentals adequades (i a la pràctica això vol dir que l'experiment ha de consistir en la difracció per una xarxa cristal·lina), els electrons presenten unes figures d'interferència que són idèntiques a les que observem en la llum o en les ones en la superfície d'un estany. I recíprocament, si fem l'experiment amb llum i la nostra font és prou feble i el nostre detector prou sensible, podrem detectar un a un l'impacte de les *partícules* de la llum: els fotons. Tant electrons com fotons presenten, si es donen les condicions experimentals adequades, una naturalesa dual ondulatoria i corpuscular.

Tornem, però, als nostres electrons. Podem, si així ho desitgem, treballar amb una font tan feble que ens asseguri que en un moment concret només un electró es trobi en el camí entre la font i la pantalla. I malgrat això, les figures d'interferència es presenten igualment. És, per tant, evident que un electró (o millor dit, l'estat d'un electró) interfereix amb si mateix. Què vol dir això? Això vol dir que, exactament com una ona de llum passa simultàniament per l'esclatxa superior i per l'esclatxa inferior i el que observem és la suma de les dues amplituds, si es donen les condicions experimentals adients. L'electró presenta un comportament ondulatori i explora com a ona les dues possibilitats que clàssicament se li presenten: passar per l'esclatxa de dalt o passar per l'esclatxa de baix. Cadascuna d'aquestes dues possibilitats té una amplitud (exactament com tenen l'ona de llum o les ones d'un estany) i és la suma de les dues amplituds la que observarem a la pantalla.

Quantifiquem una mica aquestes observacions. Si la pantalla es troba prou separada de les dues escaletes, les ones que hi arribaran seran, a tots els efectes, ones planes. L'amplitud d'una ona plana ve donada per l'expressió $\Psi(x,t) = \exp(ikx - i\omega t)$, on k és una quantitat anomenada *número d'ones*, relacionat amb el moment lineal dels electrons a través de la relació $p = \hbar k/2\pi$, i ω és la pulsació de l'ona, relacionada amb l'energia dels electrons per $E = \hbar\omega/2\pi$. Aquesta identificació entre p i E , i el moment lineal i l'energia dels electrons, respectivament, s'estableix perquè p i E són el moment i l'energia portats per l'ona. La mecànica quàntica eleva aquesta identificació a la categoria de postulat, la justificació última del qual cal trobar-la únicament en l'experiment. (Sovint convé introduir el símbol $\hbar = \hbar/2\pi$). En termes de \hbar l'amplitud d'una ona plana s'escriu com

$$\Psi(x,t) = \exp(2\pi i/\hbar)(p \cdot x - Et)$$

Les ones procedents de l'escaleta (a) tindran una amplitud $\Psi_a(x,t)$, mentre que les provinents de l'escaleta (b) tindran una amplitud $\Psi_b(x,t)$. L'amplitud total serà, per tant, $\Psi(x,t) = \Psi_a(x,t) + \Psi_b(x,t)$, mentre que la probabilitat de detectar l'electró al punt x a l'instant t vindrà donada pel mòdul al quadrat d'aquesta quantitat: és a dir,

$$|\Psi|^2 = |\Psi_a|^2 + |\Psi_b|^2 + \Psi_a^* \Psi_b + \Psi_a \Psi_b^*$$

Són precisament els últims dos termes, els responsables de les figures d'interferència. Si no hi fossin, la probabilitat de detectar l'electró al punt x a l'instant t vindria donada per la suma de la probabilitat d'haver passat per l'escaleta (a) més la probabilitat d'haver passat per l'escaleta (b), el que correspondria a una indeterminació estadística clàssica: l'electró ha passat per alguna escaleta, però no sabem per quina. És el fet de sumar les amplituds i *després* elevar al quadrat el que proporciona la interferència típicament quàntica de l'electró amb si mateix: l'electró ha passat simultàniament per les *dues* escaletes.

Com dèiem, l'electró explora tots els camins clàssics i, un cop s'ha acceptat la naturalesa ondulatòria del fenomen, no és difícil arribar a les conclusions que precedeixen. Però, com podríem calcular les amplituds de probabilitat en un cas més complicat? Tornarem a aquesta qüestió més endavant, però de moment observem que, atès que p i E són constants del moviment, podem escriure la fase de l'amplitud $\Psi(x,t)$ com

$$\int (p \, dx/dt - E) \, dt$$

on el camí $x(t)$ verifica que a l'instant inicial $t = t_0$ es troba a $x = x_0$, la posició de l'escaleta (a), i el mateix faríem en el cas del camí que passa per l'escaleta (b). Amb el disseny experimental adequat, el que passi *abans* que l'electró arribi a les escaletes (a) o (b) no és important per a les nostres consideracions, ja que simplement afegeix un factor comú a ambdues amplituds. Doncs bé, la quantitat $\int (p \, dx/dt - E) \, dt$ que, com veiem, ens dona la fase relativa rellevant per a les interferències (els camins que passen per (a) i per (b) i arriben a un punt de la pantalla determinat difereixen en el valor de $\int (p \, dx/dt - E) \, dt$), és una magnitud ben coneguda en el marc de la física clàssica. S'anomena *acció*.

Deixem momentàniament aquestes consideracions i ens traslladem en el temps a l'any 1931. És justament aquest any quan un jove físic anglès, P. A. M. Dirac, arriba a una conclusió revolucionària. Dirac intentava de conjugar en una mateixa equació els postulats de la mecànica quàntica i els preceptes d'invariància de la relativitat d'Einstein. Per què és això un problema? Sense entrar en detalls tècnics innecessaris, cal recordar només que l'equació de Schrödinger que governa l'evolució temporal d'un estat quàntic conté una derivada temporal, però dues derivades espacials. Espai i temps tenen, per tant, un paper asimètric. Va ser tractant d'arribar a una solució d'aquesta paradoxa que Dirac va proposar una equació per a descriure l'evolució d'un electró que tractava temps i espai simètricament. La peculiaritat d'aquesta equació és que per a cada estat d'energia positiva, $E > 0$, ha d'existir un estat idèntic però amb energia negativa, $E < 0$.

La relativitat d'Einstein comporta la següent relació entre energia i moment: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$. Per tant, solucions d'aquesta relació amb energia negativa són *a priori* admissibles. El que resulta sorprenent és que aquestes solucions siguin necessàries, que no puguem excloure-les com a no físiques. Per a resoldre aquest enigma cal que entenguem exactament que és el que vol dir un estat d'energia negativa i com és que ningú no ha vist mai un electró amb energia negativa voltant pel món. Com és que un electró d'energia positiva no es transforma en un d'energia negativa que emet un fotó espontàniament?

Va ser Dirac mateix, emprant el principi d'exclusió de Pauli, qui va entendre quina era la interpretació física correcta d'aquestes solucions d'energia negativa. Dirac va postular que el buit quanticorelativista, lluny de ser un lloc avorrit on no hi ha res, és de tal manera que totes els possibles estats d'energia negativa estan ocupats. En conseqüència, un electró (d'energia positiva) no pot passar a ocupar un d'aquests estats a causa del principi d'exclusió de Pauli. Per contra, sí que pot passar que un fotó exciti algun estat d'energia negativa, fet que promourà l'aparició d'un estat d'energia positiva i deixarà un *forat* en el mar d'estats ocupats d'energia negativa. El resultat és un electró (amb energia positiva) i un *forat* amb una *absència* d'energia negativa: és a dir, amb una energia també positiva. Aquest *forat* rep el nom de *antipartícula*.

Cal assenyalar, però, que aquest estat en el qual s'ha transformat el fotó (un estat consistent en un electró i un *antielectró*) no és un estat físic si el fotó és un fotó físic, és a dir, amb massa zero. La conservació d'energia i moment ho impedeix: un fotó físic no pot desintegrar-se en una parella electró-antielectró. El fotó és una partícula absolutament estable. És tracta en tot cas d'un estat *virtual*, que viu un temps i després desapareix reconstituïnt el fotó original. En el món quàntic, fins i tot en el buit quàntic, els processos virtuals passen tot el temps: les partícules es desintegren virtualment en altres que després d'una estona reconstitueixen l'estat original. Sorprenent?

Certament ho és, però no més que el fet que l'electró

explori les dues alternatives possibles quan es troba davant les esclertes i ho hem d'entendre exactament en el mateix sentit. El fotó que ha estat creat en el punt x a l' instant t i ha estat observat en el punt x' a l' instant t' ha explorat (*virtuallment*, diu el físic) totes les possibilitats, en particular aquelles que consisteixen a transformar-se en una parella electró-antielectró. Cadascuna d'aquestes parelles té una amplitud de probabilitat (com en el cas de les dues esclertes) i és la suma d'aquestes amplituds la que, elevant el seu mòdul al quadrat, ens donarà finalment una probabilitat de detecció en el punt x' i instant t' .

17

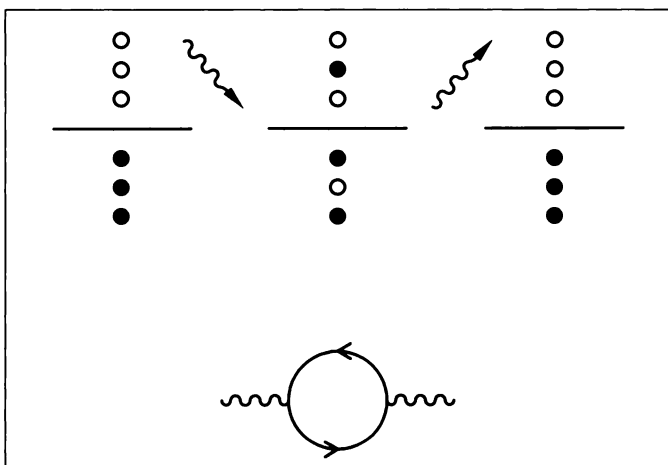


FIGURA 1. Un fotó produeix una parella virtual electró-antielectró del buit.

L'antielectró (o positró), predit per Dirac, va ser detectat per Anderson el 1932. Diu Heisenberg el 1972: «I think that this discovery of antimatter was perhaps the biggest jump of all the big jumps in physics in our century». I segurament té raó, perquè segurament és una de les poques prediccions basades en arguments gairebé estètics i en una fe cega, quasi religiosa, en les equacions matemàtiques. Si l'equació presentava una solució, aquesta havia d'existir, deia Dirac. I tenia raó.

Avançant en la nostra història uns quants anys trobem una de les figures més carismàtiques de la física del nostre segle: Feynman. El 1948, Richard Feynman madura a partir de converses indirectes amb Dirac una formulació autònoma de la mecànica quàntica i formula d'una manera matemàticament consistent el que vol dir que l'electró «explori» les possibilitats al seu abast.

Feynman postula i demostra l'equivalència total amb altres formulacions més abstractes de la mecànica quàntica, que l'amplitud de probabilitat que una partícula que a l'instant t es troba al punt x , es trobi a l'instant t' al punt x' ve donada per una quantitat $G(x,t;x',t')$ que es calcula com una suma sobre camins, sobre totes les possibilitats per anar de x a x'

$$G(x,t;x',t') = \Sigma \exp(i/\hbar) \int dt L$$

$L = p \, dx/dt - H$, s'anomena *lagrangiana*, H és una funció (anomenada *hamiltoniana*) que ens proporciona l'energia del sistema en funció de les seves variables dinàmiques. Com veiem aquesta fórmula es redueix trivialment a la que hem vist abans en el cas de l'experiència de la doble esletxa, on $H = E = \text{constant}$. Feynman ens diu, per tant, que la suma sobre camins porta un pes que no és altre que l'*acció*.

Clàssicament, és a dir, a la mecànica newtoniana, l'acció té paper un molt important. Les trajectòries del moviment són justament aquelles que minimitzen l'acció. La fórmula anterior ens diu justament en quin límit recuperem la mecànica clàssica com a límit de la mecànica quàntica. Només cal prendre el límit $\hbar \rightarrow 0$. Automàticament això fa que únicament la trajectòria que presenta el mínim de l'acció (és a dir, la trajectòria clàssica) contribueixi a la suma; la resta de trajectòries comporten oscil·lacions tan grans que s'anul·len les unes a les altres quan intentem avaluar la suma sobre camins de Feynman.

Naturalment quan parlem d'electrons o fotons i els estenem la formulació de Feynman el que hem de fer és sumar també sobre tots els possibles estats virtuals, pesats cadascun

d'aquests amb la seva corresponent acció. La suma coherent de tota aquesta infinitat d'amplituds ens proporcionarà la quantitat $G(x,t; x',t')$, o una magnitud física equivalent.

Per exemple, si considerem la interacció d'un electró amb el fotó provinent d'un cert camp electromagnètic (per exemple, un electró que es mou en el si d'un camp magnètic), tindrem un procés com el representat a la figura 2.

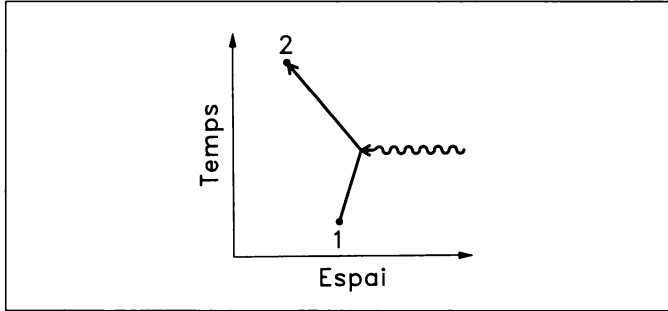


FIGURA 2. Diagrama representant la interacció d'un electró amb un fotó provinent, per exemple, d'un camp magnètic.

Però també haurem d'incloure a la suma processos com els representats a la figura 3, processos que són cada cop més i més complicats, i que involucren un nombre més i més gran de partícules virtuals. Sortosament esperem que cadascun d'aquests processos contribuïxi menys i menys al resultat final, car cada cop que un fotó i un electró interaccionen la contribució de l'acció té un factor més de α , i la constant d'acoblament electromagnètic és una quantitat molt petita ($\alpha = 1/137$, aproximadament). Això ens dóna naturalment una esperança de poder calcular les *correccions radiatives* (és a dir, l'efecte de les partícules virtuals) fins a un cert ordre en potències de α i obtenir un resultat suficientment proper a la realitat. Aquesta és, explicada en quatre paraules, la teoria de perturbacions.

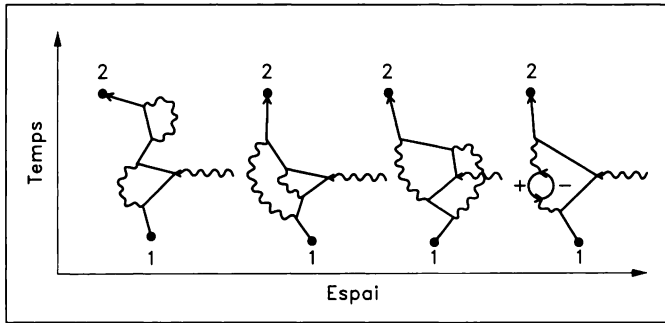


FIGURA 3. Alguns dels molts diagrames que contenen correccions quàntiques al procés representat a la figura 2 a causa del bescauvi de partícules virtuals.

LA LLUITA CONTRA L'INFINIT

Un cop hem arribat a aquest punt, sembla que ja som capaços de calcular amb una precisió tan gran com desitgem correccions quàntiques a paràmetres com és ara, per exemple, el moment magnètic de l'electró, que ens descriu la reacció d'un electró en presència d'un camp magnètic, o a moltes altres quantitats.

Una quantitat que va despertar aviat l'interès dels físics és l'anomenada *autoenergia de l'electró*. L'autoenergia és una magnitud que representem pel símbol Σ i que és en realitat una funció del moment lineal de l'electró, $\Sigma(p)$. Quan l'electró es troba en repòs, $p = 0$, $\Sigma(p = 0)$ és simplement la massa de l'electró. No és difícil dibuixar quina és la primera correcció quàntica a la massa: és donada pel diagrama simbòlicament representat a la figura 4.

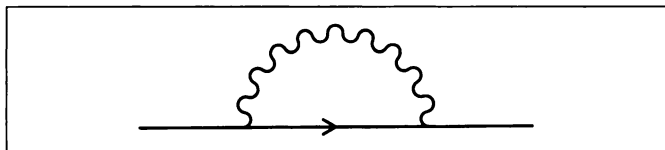


FIGURA 4. Autoenergia de l'electró.

Aquest diagrama representa el procés virtual $e \rightarrow e + \gamma(k) \rightarrow e$, on k és el quadrímoment del fotó virtual (recordem: quànticament explorem totes les possibilitats compatibles amb la conservació d'energia i moment).

Clàssicament, l'electró és una petita esfera amb càrrega elèctrica. Dins d'aquesta imatge mecanicista, l'electró té una energia electrostàtica igual a e^2/a , si a és el radi de l'esfera. Des d'un punt de vista clàssic, aquesta energia, producte de la interacció electromagnètica de l'electró amb si mateix, és possible que no generi tota la massa de l'electró, però certament hi ha de contribuir. Si igualem $mc^2 = e^2/a$, veiem immediatament que l'electró no pot tenir una massa finita i al mateix temps ser una partícula elemental ($a \rightarrow 0$). Tècnicament diem que la seva massa divergeix linealment.

És clar, totes aquestes consideracions esdevenen obsoletes en el moment en què la mecànica quàntica intervé. La interacció de l'electró amb ell mateix es fa per mitjà de diagrames com el de la figura 4, i fórmules com les de l'electromagnetisme clàssic no són aplicables. El problema és que quan hom avalua en detall aquest diagrama seguint les prescripcions de Feynman, però s'oblida de l'existència de les antipartícules, troba que

$$\Sigma(p = 0) \approx \int k dk = \infty$$

De fet, el comportament és molt pitjor: l'autoenergia de l'electró divergeix quadràticament. No és difícil veure que el resultat ha de ser necessàriament divergent. Hi ha una enorme quantitat d'estats virtuals: el fotó pot tenir, per exemple, una energia arbitràriament elevada simplement permetent que l'electró ocupi un estat d'energia negativa adient, de manera que l'energia es conservi. Aquest és un desastre ultraviolat.

Quan afegim les antipartícules, el comportament canvia dràsticament. Ara no tenim la possibilitat d'emplenar un estat d'energia negativa, perquè aquests es troben ja tots plens i el principi d'exclusió de Pauli ho prohibeix. Això redueix enorme-

ment el nombre d'estats virtuals disponibles i fa que (ometem els detalls tècnics)

$$\Sigma(p = 0) \approx \int_{\Lambda} dk / k = \log \Lambda$$

La integral, tot i ser encara divergent, és ara només logarítmicament divergent (hem introduït un *regulador* per tal de fer-la finita i controlar la divergència). Aquest fet resulta ser crucial. Abans d'explicar el perquè, però, diré que l'esmentada no és una bona manera de *regular* la integral, tot i ser certament la més senzilla. La raó es comprèn fàcilment quan calculem l'autoenergia del fotó: és a dir, la seva massa. Si ho féssim amb aquest regulador trobaríem que $m_\gamma \sim \Lambda$, la qual cosa està en flagrant contradicció amb l'observació que $m_\gamma < 10^{-10}$ eV, ja que recordem que, eventualment, $\Lambda \rightarrow \infty$.

Des d'un punt de vista clàssic, les interaccions entre electrons, positrons i fotons vénen governades pel *lagrangiana de Maxwell*, que és

$$L = -(1/4) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + J_\mu A^\mu + L_e$$

En aquesta expressió $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ és l'anomenat *tensor electromagnètic* i conté els camps elèctrics i magnètics, expressats en funció de A_μ , el potencial vector: per exemple, el camp elèctric és $E_i = F_{0i}$. El quadrivector J_μ representa el corrent dels electrons, L_e descriu el moviment lliure dels electrons. Tot i que podríem estendre'ns molt més sobre aquest lagrangiana que acabem d'introduir, val a dir que només proporciona una descripció adequada de les interaccions entre fotons i electrons. Des d'un punt de vista clàssic, això és evident perquè la minimització de l'acció corresponent condueix a les equacions de Maxwell, que descriuen l'electromagnetisme clàssic.

Tot i que té un aspecte aparentment molt diferent del que hem vist abans, aquest lagrangiana és l'extensió al cas que ens ocupa del que hem introduït abans i que descrivia el moviment d'una partícula. En aquell cas la variable cinemàtica era la prò-

pia $x(t)$, la posició com a funció del temps; ara la variable cinemàtica no és una sinó quatre: les quatre components de A_μ com funció de la posició i el temps $A_\mu(x,t)$. En el cas del moviment d'una partícula, és clar que totes les components de x són físicament rellevants. Per contra, aquest no és el cas de A_μ i la raó és que les ones electromagnètiques, els fotons en definitiva, tenen *dos* graus de llibertat a cada punt de l'espai temps, que corresponen clàssicament a les dues polaritzacions possibles d'una ona transversal. Per contra, A_μ té quatre graus de llibertat per a cada punt de l'espai temps. Per a eliminar aquests graus de llibertat és essencial que la teoria que descriu l'electromagnetisme tingui una simetria molt especial, una simetria que consisteix a redefinir $A_\mu \rightarrow A_\mu - \partial_\mu \theta$, on θ és una funció arbitrària, i que res canviï. Això permet, per exemple, triar un *gauge*, on, per exemple, A_μ sigui zero. Això encara ens deixa un grau de llibertat redundant, però una anàlisi més acurada ens ensenya que aquest grau de llibertat no té conseqüències físiques. Les teories que tenen una simetria com l'esmentada es diuen teories *gauge*, i l'electrodinàmica quàntica, la teoria quàntica dels fotons i dels electrons, n'és l'exemple més senzill. De fet, és ben conegut de tots els estudiants d'electromagnetisme que per a trobar una solució de les equacions de Maxwell, cal «fixar un *gauge*». Això vol dir que no hi ha una solució única d'aquestes equacions si no és que, d'entrada, diguem, per exemple, $A_0 = 0$. I la raó és ben senzilla: una solució descrita per A_μ i una altra descrita per $A_\mu - \partial_\mu \theta$ són indistingibles físicament i, per tant, les equacions de Maxwell difícilment poden determinar un únic A_μ .

Aquesta és naturalment una simetria que volem preservar. Per exemple, és justament aquesta simetria la que ens ajuda a entendre que la massa del fotó sigui estrictament zero: la raó és que un terme de massa que afegim al lagrangiana de Maxwell viola la simetria *gauge*. També ens prohibeix regular de qualsevol manera les integrals divergents que apareixen en la nostra lluita contra l'infinit. Ja hem vist que fer-ho pot comportar una massa per al fotó molts ordres de magnitud per sobre del que és físicament acceptable. Aquesta simetria té, de fet, conseqüències molt

profundes: si ens assegurem que treballem d'una manera que la simetria *gauge* és manifesta, podem estar segurs que en cap moment, a cap ordre en teoria de perturbacions, en cap dels processos virtuals que hem dibuixat, obtindrem un infinit que no sigui justament proporcional a algun dels termes del lagrangia de Maxwell, atès que aquest és l'únic que és invariant *gauge*.

Tot i que les antipartícules han millorat el mal comportament ultraviolat de l'electrodinàmica i que la simetria *gauge* ha reduït considerablement el nombre de possibles infinits, aquests no han desaparegut completament. Bé, com dèiem, en realitat no tenim mai cap infinit de veritat, ja que arbitràriament regulem les integrals convertint-les a finites; el que veritablement volem dir és que apareixen logaritmes de l'escala Λ on tallem les integrals només a un nombre molt petit de magnituds físiques. L'autoenergia del fotó n'és una (encara que el regulador que allà hem emprat era deficient, per manca d'invariància *gauge*, fent-ho bé segueix apareixent una divergència logarítmica). Un altre lloc on apareix és en el vèrtex que ja hem vist fotó-electró-electró. I bé, això és tot. Enlloc més apareixen els enutjosos logaritmes. La lluita contra l'infinit és a punt de ser guanyada.

Per acabar, aquests logaritmes poden ser completament eliminats *redefinint* només dues quantitats: la massa de l'electró i la constant α . Això ens permet d'eliminar completament tota traça del regulador Λ i, finalment, eliminar-lo fent-lo molt gran, infinit si volem. Tot allò observable, totes les prediccions són ara finites i concretes. Tot el que hem de fer és mesurar el valor de la càrrega elèctrica i de la massa de l'electró, ajustar els nostres paràmetres del lagrangia i podrem fer prediccions tan precises com vulguem.

Potser l'exemple més espectacular és el moment magnètic de l'electró. Aquest es pot mesurar amb una gran precisió. Tanta precisió, de fet, que el fa la quantitat mesurada més ben coneguda de tota la física. L'error és menor que l'amplada d'un cabell comparada amb la distància de Los Angeles a Nova York. Impressionant. El valor experimental actual (en unitats del magnetó de Bohr) és 1.001159652193 (10). El valor teòric que s'ob-

té fins a ordre α^4 és 1.00115965246 (20). L'acord és excel·lent. Ens ensenya que l'electrodinàmica quàntica i la teoria de perturbacions realment funcionen.

Hem simplificat extraordinàriament un problema que va ocupar els cervells més privilegiats de la física gairebé vint anys. Feynman, Schwinger, Tomonaga i molts altres són els herois d'aquesta lluita contra l'infinit. Una lluita que semblava impossible de guanyar i que té encara moltes sorpreses amagades segurament.

El fet és que són molt poques, poquíssimes, les teories en què podem eliminar els infinits que apareixen en la teoria de perturbacions. Aquelles teories on això és possible es diuen *renormalitzables*. L'electrodinàmica, la teoria quàntica dels fotons i dels electrons, ho és, i que ho sigui és conseqüència que és una teoria *gauge*. No és estrany, per tant, que les teories *gauge* s'hagin convertit en un paradigma de la física de partícules del segle XX.

LES ESTRANYES INTERACCIONS FEBLES

Continuem la nostra exploració. El món no està compost únicament d'electrons i fotons, és clar. Seria certament un món molt avorrit on la feina del físic de partícules seria ja innecessària.

Sembla, però, que els físics de partícules tindrem feina per molts anys. El món és, ben segur, molt més complicat que aquest món fred i previsible, amb només fotons i electrons. Hi ha, per exemple, tot el fascinant món de les interaccions fortes, les que mantenen units protons i neutrons dins dels nuclis. Són unes interaccions molt intenses que encara no entenem completament des d'un punt de vista quantitatiu. Sabem, a més, que ni protons ni neutrons són realment partícules elementals. Cadascuna d'aquestes partícules està composta de tres unitats que, aquestes sí, creiem que són elementals —com a mínim tant com pot ser-ho un electró.

Aquests components dels nucleons són els *quarks*. Per a

construir els nucleons (neutrons i protons) en necessitem de dues classes, que reben els noms de *up* i *down*, respectivament. Els quarks es mantenen units, formant nucleons, gràcies al bescanvi d'unes partícules anomenades *gluons*, que són els portadors de la interacció forta.

Però potser un dels aspectes més intrigants de perquè el món és com és, és la sorprenent replicació de totes les partícules. La matèria ordinària està composta d'electrons i de quarks *up* i *down*. Aquestes partícules formen el que es diu la *primera generació* i les partícules que la componen són estables. Però hi ha dues generacions més, còpia perfecte de la primera, però amb partícules progressivament més massives. A la segona generació, trobem el *muó* i els quarks *charm* i *estranys*; mentre que a la tercera hi trobem els quarks *top* (recentment descobert a Fermilab) i *bottom*. La contrapartida de l'electró i del muó es diu *tau*, i és unes tres mil vegades més pesat que l'electró. Com dèiem, a part de ser més pesades, aquestes partícules de la segona i tercera generació són idèntiques a les de la primera, a les quals poden decaure. No són, per tant, estables i, de fet, no seria gaire equivocat dir que, a part del muó, que sovint és present en raigs còsmics, no es troben a la natura. Entendre per què hi són i per què tenen les masses que tenen continua essent el desafiament més gran de la física de partícules.

No hem parlat encara d'una partícula realment fascinant: el *neutrí* (del qual n'existeixen també tres classes). Va ser introduït per Pauli el 1929. La seva descoberta no fou fins al 1956 i per bones raons: es tracta d'una partícula sense massa —si bé resultats experimentals molt recents avançats l'any 1998 pel grup experimental japonès de Superkamiokande, i avui àmpliament acceptats per la comunitat científica, però encara per confirmar, suggereixen que la massa del neutrí pot ser diferent de zero, però extraordinàriament petita—, sense càrrega elèctrica, no subjecta a les interaccions fortes... Com interacciona, doncs, el neutrí?

El neutrí interacciona únicament amb un tipus de força del qual no n'hem parlat encara: les interaccions febles. Hem

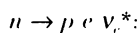
títulat aquesta secció «les estranyes interaccions febles», i efectivament ho són.

Comencem repassant breument l'abast de les diferents interaccions. Si prenem una longitud de referència, per exemple 10^{-17} metres, la distància més petita mai explorada experimentalment, les intensitats relatives de la interacció forta, electromagnètica, feble i gravitatòria són 1 , 10^{-2} , 10^{-6} i 10^{-40} , respectivament. Clarament, la interacció gravitatòria és negligida en el món de les partícules elementals. Les interaccions fortes i electromagnètiques presenten un comportament molt semblant amb la distància: decauen aproximadament com $1/r$. Aquest comportament és exacte en el cas de l'electromagnetisme, però a la distància de 10^{-15} metres es produeix un canvi: la força forta ja no decreix sinó que es manté constant. No prosseguirem aquesta línia, però potser seria interessant esmentar que entendre aquest canvi de comportament d'una manera quantitativa és encara una assignatura pendent de la física d'altres energies.

82

El comportament més peculiar, però, és el de les interaccions febles. La intensitat decreix en augmentar la distància d'una manera abrupta al voltant de 10^{-16} metres. De fet, es va creure, quan no es podien fer experiments a distàncies tan curtes, que la interacció era puntual. Aviat es va suggerir, però, que la partícula o les partícules responsables de les interaccions febles, a diferència del fotó, tenien una massa. Aquesta massa no es podia determinar fins que disposéssim d'acceleradors que exploressin clarament distàncies més petites. Quan qui escriu aquest article va acabar la llicenciatura de física, tot el que se sabia era que la massa d'aquesta o aquestes partícules havia de ser més gran que 50 GeV i poc més.

Ens estem avançant una mica massa, però. Tornem enre-
re als anys que es va començar a entendre, des d'un punt de vista
teòric, les interaccions febles. Una de les reaccions nuclears més
antigues és la desintegració β del neutró



ν_e^* és l'antipartícula associada al neutrí. La vida mitjana del neutró és de 887 segons. Una vida mitjana extraordinàriament llarga al món de les partícules elementals: però que aquesta vida mitjana valgui el que val és un dels fets que han estat determinants en la història de l'univers, concretament en els celebrats primers tres minuts, quan la nucleosíntesi de tots els elements primordials va tenir lloc. La raó per la qual aquesta vida és tan llarga és simplement per la poca energia disponible per al procés. La massa del neutró és 939.6 MeV, mentre que la del protó és 938.3 MeV. Si a això hi afegim els 0.511 MeV de la massa de l'electró, veiem que pràcticament no li resta energia disponible. La diferència és, de fet, tan minsa que una petita modificació (per exemple, que el protó hagi de sortir amb una energia mínima, o que l'entorn canviï lleugerament les masses) impossibilita completament el procés: el neutró és, de fet, estable dins de la gran majoria de nuclis.

Fermi va ser la primera persona que va proposar una teoria per a la descripció de les interaccions febles. La seva teoria va proporcionar molts anys (i en molts casos encara proporciona) una descripció suficientment acurada. La teoria es coneix amb el nom de *V-A*. Sense entrar en complicacions innecessàries, aquí esmentarem les seves característiques principals. En primer lloc, cal fer esment que els quarks o leptons (com l'electró o el muó) són *fermions*, partícules amb espín 1/2 i que, per tant, tenen en realitat dos graus de llibertat. El cas és que les interaccions febles afecten només un d'aquests graus de llibertat i no l'altre. De fet, quan les interaccions febles s'analitzen amb més detall, una característica sorprenent emergeix: un procés i el mateix procés tal com el veuríem reflectit a un mirall no tenen les mateixes propietats des del punt de vista de les interaccions febles. Veritablement és un món estrany, i quan hom explica aquesta part de la física als estudiants no pot deixar de preguntar-se el perquè la natura ha triat una descripció tan barroca. En segon lloc, cal assenyalar que les interaccions febles a la teoria de Fermi vénen descrites per una interacció puntual en què quatre fermions (per exemple neutró, protó, electró i neutrí en el cas de

la desintegració β del neutró) es troben en un punt de l'espai temps, sense el bescanvi de cap partícula (és a dir, no com en el cas de l'electromagnetisme, on electrons i positrons interaccionen bescanviant fotons). Sembla un detall petit, però no ho és.

Considerem, per exemple, la contribució a l'autoenergia d'un fermió provinent de la teoria de Fermi i comparem-la amb la de l'electromagnetisme (que recordem és logarítmicament divergent). Les dues contribucions virtuals més senzilles les hem dibuixat a la figura 5.



FIGURA 5. *Correccions virtuals a l'autoenergia de Fermió a l'electrodinàmica quàntica i al model de Fermi, respectivament.*

84

Notem que a l'electromagnetisme tots els vèrtex tenen tres «potes», mentre que aquí en tenen quatre. Aquesta és la conseqüència de no tenir el bescanvi de cap partícula tal com té el fotó. Les conseqüències quant a les correccions quàntiques són profundes. Si calculem en aquest cas concret la contribució de les interaccions febles a l'autoenergia, veurem que és quadràticament divergent, fins i tot tenint en compte la contribució de les antipartícules. Pitjor encara, les divergències l'únic que fan és empitjorar cada cop que es tenen més en compte les contribucions virtuals. A diferència de l'electromagnetisme, la teoria de Fermi no és renormalitzable.

Aquesta era la situació als anys quaranta, cinquanta i seixanta. Es disposava d'una teoria que funcionava prou bé, però aquesta teoria era simplement incompatible amb algunes prediccions de la mecànica quàntica, que com hem vist exigeix la presència de les correccions radiatives.

De fet, la teoria de les interaccions febles de Fermi era també insatisfactòria per una segona raó: era necessari considerar separatament cada un dels processos febles. Per exemple,

desintegracions com $n \rightarrow p e \nu_e^*$, $\Lambda(1116) \rightarrow p e \nu_e^*$, $\Lambda(1116) \rightarrow p \mu \nu_\mu^*$, $\Sigma \rightarrow \Lambda e \nu_e$ entre moltes altres requerien, cadascuna d'aquestes, un terme per separat en el lagrangiana de la teoria de Fermi. Atès que hi ha milers i milers de desintegracions febles possibles, difícilment pot considerar-se aquell procés com una descripció fonamental, sinó, en tot cas, *efectiva* de la natura.

L'any 1961 Murray Gell-Mann i altres van formular el model quark, dels quals ja n'hem parlat al començament d'aquest apartat. L'existència dels quarks fou confirmada a començament dels anys setanta en experiments realitzats en SLAC. El model quark postula que totes les partícules amb interaccions fortes estan compostes de fermions elementals. Són les diferents combinacions possibles dels diversos quarks (*up* i *down* són els que componen la matèria ordinària, però no és difícil produir també partícules que contenen el quark *strany*), juntament amb les diferents possibilitats de combinar els moments angular orbital i d'espín, el que produeix l'estol de partícules amb interaccions fortes, els *hadrons*.

El model quark incorpora, doncs, un element de racionalitat molt important a la física de les interaccions fortes. Basat en aquest model, desenvolupaments posteriors han conduït a una teoria satisfactòria per a aquestes interaccions, que no és l'objecte d'aquestes línies, però que segurament sí que serà objecte de l'atenció de l'Acadèmia Sueca en els propers anys. En altres paraules, el Premi Nobel per a la QCD, que així es diu la *teoria de les interaccions fortes*, no tardarà.

I les interaccions febles? Poden els quarks resoldre els problemes teòrics que presenta el model de Fermi? D'entrada, el model quark aporta també aquí una simplificació impressionant. Ara, no hem de considerar separatament la desintegració del neutró, de la partícula Λ , etc. Tots els processos febles coneguts als anys seixanta poden descriure's dins del model quark acceptant que la interacció feble es produeix per mitjà d'una interacció puntual idèntica a la del model de Fermi, la qual involucra parelles de quark *up* i *down* i parelles $e \nu_e$ en les diferents combinacions possibles (no discutim aquí els processos involucrant

el quark *estranys*, que complica les coses però només una mica). És a dir, que podem tenir interaccions entre dos *up* i dos *down*, entre dos electrons i dos neutrins, o bé, entre una parella *up-down* i una parella electró-neutrí, concretament aquesta darrera combinació és la rellevant per a la desintegració β . La figura 6 exhibeix la desintegració del neutró, tal i com s'entén a la teoria de Fermi amb el model quark.

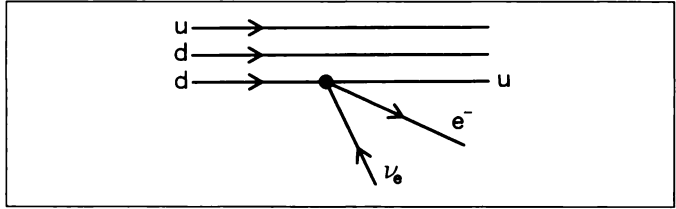


FIGURA 6. La desintegració β del neutró al model de Fermi amb quarks.

86

La reducció del nombre de paràmetres arbitraris és enorme i el model de Fermi reformulat en termes de quarks pot tenir aspiracions, finalment, a ser una teoria fonamental. Dissortadament, fins i tot dins del model quark, els problemes amb la mecànica quàntica persisteixen.

L'any 1954, quan 't Hooft tenia vuit anys i Veltman tot just acabava els seus estudis de física va aparèixer un article que havia d'influir profundament la física. Aquest article anava signat per R. Mills i C. N. Yang. Yang fou un dels descobridors de l'estranya propietat de les interaccions febles quan es venen reflectides en un mirall i que coneixem tècnicament amb el nom de *violació de paritat*. Aquest article no tenia, però, res a veure amb això.

Per a entendre l'aportació de Mills i Yang cal que tornem a la desintegració del neutró i al fet que la massa del protó i del neutró són molt properes. De fet, sota les interaccions fortes neutró i protó són essencialment la mateixa partícula. És cert que tenen una càrrega diferent, però això té a veure amb l'electromagnetisme i no amb les interaccions fortes. A escala quark el

contingut del protó és *uud* ($u = up$, $d = down$), mentre que el del neutró és *udd*. El bescanvi d'un quark *up* per un quark *down* no altera les propietats de la partícula. Ens trobem, per tant, en presència d'una simetria de la natura. Aquesta simetria rep el nom d'*espín isotòpic* o *isospín*.

L'electromagnetisme és una teoria *gauge*, això ja ho sabem. A l'apartat anterior hem parlat sobretot de com les transformacions *gauge* eren essencials per a eliminar graus de llibertat redundants. No hem parlat, però, de com les transformacions *gauge* modifiquen el grau de llibertat de l'electró i del positró. Bé, aquest és el moment de fer-ho. Si redefinim el camp electromagnètic com $A_\mu \rightarrow A_\mu - \partial_\mu \theta$, per a preservar la simetria cal que redefinim la funció d'ona de l'electró amb una fase: $\Psi \rightarrow e^{i e \theta} \Psi$.

La fase de l'electró (una fase *local*, no global) és no observable. Evidentment, la invariància local implica la global, però no a la inversa. Yang i Mills van tenir la idea següent: si les interaccions fortes són invariants sota canvis *globals* d'isospín, per què no es podia explorar la possibilitat d'estendre aquesta simetria al cas *local*? Si quan es fa això a l'electromagnetisme ens apareix necessàriament el camp electromagnètic i, per tant, el fotó, quines partícules ens apareixeran per a realitzar la simetria d'isospín des d'un punt de vista local?

La idea de Yang i Mills era que probablement aquestes partícules tenien alguna cosa a veure amb les interaccions fortes. Yang i Mills estaven equivocats, però. Les interaccions fortes poden efectivament derivar-se per un procediment inspirat en el de Yang i Mills, però no tenen res a veure amb l'exigència de la simetria d'isospín des d'un punt de vista local, sinó amb un nou nombre quàntic que ni Yang ni Mills podien sospitar que existís al 1954, atès que la seva necessitat esdevé evident només quan els quarks foren introduïts per Gell-Mann i altres: de fet, la teoria de Yang i Mills fou pensada originàriament en termes de nucleons.

Formuleu-la, però, en una visió moderna, en termes de quarks. El que la invariància d'isospín vol dir és que hem d'agrupar el quark *up* i el quark *down* com agrupem les dues com-

ponents de l'espín d'una partícula d'espín $1/2$ en un doblet. En aquest llenguatge, la simetria d'isospín és simplement la simetria $SU(2)$, com és familiar a qualsevol estudiant de mecànica quàntica. Per tant, la fase θ de l'electromagnetisme ha estat substituïda per una matriu Ω de $SU(2)$. I la transformació del camp electromagnètic $A_\mu \rightarrow A_\mu - \partial_\mu \theta$ se substitueix per $A_\mu \rightarrow A_\mu - \Omega^{-1} \partial_\mu \Omega$. Això vol dir, naturalment, que el propi A_μ és una matriu (—tècnicament pertanyent no a $SU(2)$ sinó a l'àlgebra de $SU(2)$ — que descriu no un «fotó», sinó tres: dos de carregats i un de neutre. Avui en dia sabem que aquestes són les partícules W i Z , responsables de les interaccions febles, però a l'època ningú va saber què fer-ne, d'aquestes partícules.

Hi havia una bona raó per a això. Les partícules W i Z havien de ser molt massives perquè les interaccions febles tenen un abast molt curt i ningú tenia la més remota idea de com donar massa a aquestes partícules sense trencar la invariància *gauge* que tant havia costat introduir. A poc a poc, en el decurs dels anys seixanta es va començar a veure la llum. Una contribució fonamental fou la de S. Weinberg qui, inspirat en el mecanisme de la superconductivitat, va proposar que l'addició d'un isodoublet de partícules escalars permetria aquesta aparent quadratura del cercle: donar masses mantenint la simetria *gauge*. La idea bàsica és la de *trencament espontani*. La simetria *gauge* en el cas de les interaccions febles és exacte des del punt de vista del lagrangiana, però l'estat fonamental no la respecta. La situació és, en tot, semblant a la d'un ferromagnet. Des del punt de vista del hamiltonià (del sistema), tant li fa que els moments magnètics del material apuntin cap amunt o cap avall (en una direcció de quantització arbitrària). Però cap alguna direcció específica han d'apuntar, cap algun tros de material determinat! Una petita fluctuació decideix una direcció privilegiada i cap aquesta direcció assenyalava la magnetització del material. En el cas de les interaccions febles, la simetria $SU(2)$ és perfecta des d'un punt de vista hamiltonià, però l'addició dels camps escalars permet d'introduir un potencial que fa que un estat on hi ha una «magnetització» sigui privilegiat. Quina, tant és, però el sistema prefe-

reix un estat fonamental «magnetitzat». Això selecciona una direcció a $SU(2)$. Una altra direcció donaria una física equivalent. El fet, però, és que la simetria ha estat trencada i fer ara una transformació *gauge* en aquest estat li costa energia, al sistema. Les partícules W i Z tenen ara una massa. Per així dir-ho, la simetria *gauge* és ara una simetria oculta. Aquest és l'anomenat *mecanisme de Higgs*.

El mateix Weinberg, juntament amb S. Glashow i A. Salam varen proposar finalment el que avui coneixem com a *model estàndard de les interaccions electrofebles* (l'afegit *electro* és a causa que és possible incloure també l'electromagnetisme dins d'una descripció unificada). Els tres varen rebre el Premi Nobel de Física el 1984, un cop les partícules W i Z varen ser experimentalment descobertes al CERN el 1983.

Com ja hem tingut ocasió de discutir, el fet que les interaccions febles vinguin mitjançades per una partícula *gauge* i, per tant, abandonem el model de Fermi ja definitivament ens dóna noves esperances. Podrem finalment donar un sentit a les correccions radiatives.

59

L'HOME DEL CIGAR I EL SEU ESTUDIANT

Així deien a Veltman els alumnes de la Universitat Autònoma de Madrid, on Veltman va ser professor visitant un cert temps. Veltman era professor de la Universitat d'Utrecht als Països Baixos; 't Hooft va anar un bon dia de l'any 1969 a veure'l per demanar-li un tema per a realitzar la seva tesi doctoral. «Demostri que el model de Glashow-Weinberg-Salam és renormalitzable», va ser la resposta de Veltman.

Això no era una feina gens senzilla. Va portar molts anys a físics eminents com Tomonaga, Schwinger i Feynman demostrar que l'electrodinàmica quàntica és renormalitzable, que la mecànica quàntica i l'electromagnetisme no eren incompatibles. (Per aquest treball, tots tres van rebre el Premi Nobel de Física el 1965.) Aquí els obstacles eren increïblement més grans, no

solament perquè la simetria *gauge* és molt més complicada, sinó que, a més, està *trencada*.

Veltman mateix portava ja un cert temps treballant en el problema. Ell havia calculat la renormalització en una teoria on el W i el Z són massius, però sense el concurs del mecanisme de Higgs: és a dir, en una manera que clarament viola la simetria *gauge*, incloent-hi només les primeres correccions virtuals, el que en la parla dels experts diem partint d'un *loop*. La primera feina de 't Hooft i Veltman va consistir a calcular en la mateixa teoria dos *loops*: és a dir, tenint en compte les correccions quàntiques virtuals a segon ordre en teoria de perturbacions. No va ser una sorpresa veure que el comportament ultraviolat de la teoria sense el mecanisme de Higgs era dolent. El model era clarament no renormalitzable.

Cal tenir ben present que es tracta de treballs d'una complexitat tècnica extraordinària. Tant és així que els càlculs només van ser possibles gràcies a un programa de manipulació algebraica per ordinador anomenat *Scoonship* que va fer Veltman mateix i que és el primer que mai es va escriure. Els seus successors Reduce i posteriorment Maple i Mathematica són avui dia una eina comuna del físic teòric.

A part de problemes tècnics hi havia molts problemes conceptuals. Ja hem comentat en seccions precedents que, si bé és essencial la simetria *gauge* del problema, en la resolució de les equacions de moviment (semblants a les equacions de Maxwell de l'electromagnetisme) i, en general, en tots els passos intermedis, es necessita triar un *gauge*. Hem parlat en el cas de l'electromagnetisme d'una tria: $A_0 = 0$. Aquesta és solament una de les moltes possibles, però té un greu inconvenient: no és invariànt relativista. A la pràctica, això vol dir que totes les expressions en estadis intermedis del càlcul no són invariants relativistes. Naturalment, com que el resultat final no pot dependre de la tria del *gauge*, la invariància relativista es restaura en el resultat final, però és una complicació molt gran afegida a un problema ja complex. Evidentment, el mateix problema es presenta a l'electromagnetisme i allà hom fa una tria diferent a $A_0 = 0$.

Normalment s'imposa la condició $\partial_\mu A_\mu = 0$, que és invariant relativista. Aquesta condició, que elimina un dels graus de llibertat redundants i el grau de llibertat restant no físic, com ja hem tingut ocasió de comentar, és inofensiu: no s'acobla a cap partícula física.

Malauradament, a la teoria de Glashow-Weinberg-Salam el grau de llibertat redundant sí que s'acobla al món real. Cal eliminar-lo. Aproximadament per la mateixa època on 't Hooft i Veltman van començar a treballar en el problema de la renormalització del model estàndard, dos físics russos L. Faddeev i V. Popov van trobar la solució. Calia afegir una nova partícula al model, però aquest cop era una partícula fictícia. Fictícia perquè es comporta com un fermió, però no té espín semienter. Una partícula, en definitiva, que Faddeev i Popov van anomenar *ghost* ('fantasma'). Una partícula tan poc física no ens ha d'amoïnar, però. Aquesta partícula no es pot produir en cap experiment. És una partícula que incorporem només com un artifici de càlcul. Faddeev i Popov varen demostrar, però, que afegir-la permetia d'eliminar el grau de llibertat redundant i obtenir els resultats correctes. Aquesta era una de les eines que necessitaven 't Hooft i Veltman.

No s'acabaven aquí les dificultats que calia superar. El següent entrebanc no era menys difícil. En parlar de la lluita dels físics dels anys quaranta i cinquanta contra els omnipresents infinits, hem parlat de la necessitat de regular les integrals presentant un mal comportament ultraviolat d'una manera compatible amb la simetria *gauge*. Cap dels reguladors emprats per a l'electrodinàmica quàntica eren apropiats per al model de Glashow-Weinberg-Salam. Calia alguna idea nova.

La idea va ser simplement genial. Calia treballar en un nombre fictici de dimensions de l'espai temps, fins i tot complex. Per què? 't Hooft i Veltman varen demostrar que les ja familiars integrals divergents, quan s'avaluaven en un nombre de dimensions de l'espai temps arbitrari i complex, es transformen en funcions meromorfes, que fora de quatre dimensions són finites i que les podem determinar sense dificultat. Aquest és un regula-

dor perfectament invariant *gauge*, i no solament això, sinó que des d'un punt de vista tècnic ha facilitat extraordinàriament el càlcul de les correccions radiatives en moltes altres teories.

Tots els ingredients estaven ja a l'abast dels nostres protagonistes. En un parell de famosos treballs que varen aparèixer l'any 1971, 't Hooft i Veltman observen que els infinits cancel·len al model de Glashow-Weinberg-Salam amb el mecanisme de Higgs tant a un, com a dos *loops*. Es convencen també que la cancel·lació persisteix a qualsevol ordre en teoria de perturbacions: és a dir, per a correccions virtuals arbitràriament complicades.

Posteriorment la demostració va ser perfeccionada, i una demostració general, vàlida a qualsevol ordre en teoria de perturbacions, va ser formulada per B. Lee i J. Zinn-Justin. El model estàndard és renormalitzable.

LES CORRECCIONS QUÀNTIQUES... I ALTRES

Podríem, segurament, dir que el Premi Nobel que l'Acadèmia Sueca ha atorgat a 't Hooft i Veltman ha estat atípic, 't Hooft i Veltman no han formulat cap teoria nova, ni han proposat cap nova partícula. El treball pel qual 't Hooft i Veltman han estat premiats és un treball tècnic, però un treball tècnic que, a més d'extraordinàriament difícil i que requereix molts ingredients físicament motivats, té conseqüències profundes per a la nostra comprensió del món.

Les interaccions febles i la mecànica quàntica eren incompatibles quan el marc teòric era la vella teoria de Fermi. Només el model de Glashow-Weinberg-Salam, amb el mecanisme de Higgs incorporat, tenia una possibilitat de reconciliar els dos aspectes, 't Hooft i Veltman han demostrat que aquesta possibilitat era correcta.

Això ha obert la porta, naturalment, a calcular les correccions quàntiques a tot tipus de processos i magnituds relacionats amb les interaccions febles i, per tant, a permetre una compara-

ció precisa amb l'experiment. Aquest, d'altra banda, ha millorat extraordinàriament gràcies a la posada en funcionament de l'accelerador LEP al CERN, una anella de 26 km, on electrons i positrons es fan col·lisionar amb una energia de fins a 200 GeV. El LEP ha permès, per exemple, de determinar la massa de la partícula Z amb una precisió veritablement impressionant: $M_Z = 91.187 \pm 0.007$ GeV. La precisió en la determinació de M_H és lleugerament menor. Comparem aquesta precisió amb el pobre coneixement de fa només uns anys a què abans hem fet referència $M_H > 50$ GeV i veurem l'enorme progrés realitzat. Bona part de la feina ha estat deguda al progrés experimental, però una gran part es deu que hem estat capaços, gràcies al treball de 't Hooft i Veltman, de calcular correccions quàntiques. La precisió és tal que les correccions quàntiques són avui absolutament essencials per a la comparació entre teoria i experiment. Si no s'arriba a tenir en compte, el model estàndard estaria lluny dels resultats experimentals per a moltes desviacions estàndard.

Dos detalls més, fins un cert punt anecdòtics, ens faran veure quin és el grau de precisió assolit. Fa ja uns anys els enginyers responsables del funcionament de l'accelerador LEP van detectar anomalies en la diferència de potencial entre el tub per on circulen electrons i positrons, i el terra, entre d'altres. Es tractava d'anomalies minúscules, que haurien passat desapercebudes si no arriba a ser perquè el grau de precisió era tal que afectaven la mesura de la massa de la Z. Aquestes anomalies es produïen regularment al llarg del dia, però sense cap raó que aparentment ho justificués. Quina fou la sorpresa dels enginyers quan varen descobrir finalment que era perfectament possible predir quan es produïrien les anomalies... consultant l'horari de trens de la SNCF!

L'accelerador LEP es troba, soterrat naturalment, a uns cinc quilòmetres de la via del tren que, procedent de França, arriba a Ginebra. Per aquesta via, circula el TGV diverses vegades al dia, el corrent de retorn del qual provoca distorsions locals del camp elèctric, que són suficientment grans com per a ser detectades a LEP. Segons els rumors, els enginyers van caure en

quin era el problema quan en una de les periòdiques vagues de la SNCF les anomalies varen desaparèixer.

Però potser més espectacular encara va ser quan es va veure que era necessari tenir en compte el moviment de la lluna per a mesurar la massa de la partícula Z ! Tots sabem que existeixen les marees i que, si bé en una mesura molt més petita, aquestes afecten també la terra ferma. El túnel del LEP no és una excepció: les marees provoquen distorsions en la posició de l'òrbita dels electrons i positrons, un efecte extraordinàriament petit, de l'ordre dels 100μ (o menys encara, però que té conseqüències sobre l'energia del feix i, per tant, sobre la mesura de M_Z). Com veiem, no són solament les minúscules correccions quàntiques les que cal tenir en compte quan volem estudiar les interaccions febles. Clarament, si a un experiment de física de partícules hem de tenir present la influència de la lluna, és que hem arribat a un altíssim grau de precisió.

Saber que les teories de què disposem descriuen totes les interaccions entre partícules elementals ens ha d'omplir de satisfacció, però cal donar la volta a l'argument. Quan hem començat a analitzar els efectes quàntics, hem vist que l'electró explorava d'una manera virtual totes les possibilitats al seu abast, i el mateix passa, és clar, per a altres partícules com H i Z . Les correccions quàntiques, per tant, ens obren una finestra —virtual, però una finestra no gensmenys— a totes aquelles partícules que pel fet de ser excessivament pesades no podem encara produir.

Justament així, els físics teòrics van saber que el quark *top* havia de tenir una massa a prop de 170 GeV i un parell d'anys després els físics de Fermilab van descobrir-lo, determinant que $m_{top} = 175 \text{ GeV}$. Es feia encaixar així, com en un mecanisme d'un rellotge suís, una de les darreres peces del model estàndard.

Dissortadament, els resultats experimentals no són encara prou concloents per a determinar si l'últim dels ingredients essencials del model de Glashow-Weinberg-Salam existeix o no. Ens estem referint, és clar, al Higgs, la partícula escalar que

dóna massa a la W i la Z (i de retruc a totes les altres partícules) dins del model estàndard. Malgrat que encara no s'ha proporcionat una resposta conclouent en aquest sentit, els experiments recents sí que han proporcionat valuosa informació, amb l'ajut de les correccions quàntiques i el seu control, sobre quins dels possibles mecanismes de trencament de la simetria són encara possibles i quins han estat exclosos definitivament. Segurament no tindrem una resposta definitiva fins al 2005, quan l'accelerador LHC començarà a funcionar.

El segle va començar amb una proposta revolucionària, la hipòtesi del *quàntum*, una hipòtesi que va portar a abandonar la descripció clàssica del món. Els anys que van precedir la Segona Guerra Mundial van ser uns anys on la mecànica quàntica es va anar bastint d'una manera gradual fins a obtenir un marc consistent de descripció del món microscòpic. Els anys que van seguir a la guerra van veure com les diferents interaccions, l'electromagnètica forta i feble, van ser successivament incorporades dins d'aquest marc quàntic. Això va representar entendre el concepte de la renormalització i del tractament consistent de les correccions virtuals en un marc quàntic i relativista. La darrera clau de volta d'aquest edifici la van posar 't Hooft i Veltman, i per això han estat justament guardonats.

La física de partícules es troba, a la darrerria del segle XX, en una situació paradoxal. D'una banda, tenim un marc que descriu perfectament dins del marc quàntic i relativista totes les interaccions conegudes, amb la notable excepció de la gravitació, i això és clarament positiu i ens hauria de satisfer. D'altra banda, molts físics de partícules es troben *dissatisfets* justament perquè el marc que proporcionen les teories *gauge* funciona *massa bé*. Curiosa gent, els físics de partícules, que la cosa que més desitgen és que les teories que acaben de proposar fallin! Amb això volem dir que per molt que s'ha buscat pel dret i pel revés no s'ha trobat ni una sola indicació de nous fenòmens físics ni, molt menys encara, cap indici que posi en qüestió els fonaments de la teoria, i això posa nerviosos a molts físics (mal?)acostumats a una successió trepidant de descobertes.

Això no vol dir que no hi hagi problemes teòrics per resoldre. La quantització de la gravitació n'és un, però també per què les masses de les partícules són les que són, per què hi ha tres generacions, per què els grups de *gauge* són els que són i, sobretot (per la previsible immediatesa de nous resultats experimentals) quin és el mecanisme que dóna masses (és el mecanisme de Higgs, correcte?). Esperem que hi hagi aviat nous resultats experimentals. Si no és així, ens podríem trobar en pocs anys en la mateixa situació que va portar a Lord Kelvin a declarar a la darreria del segle XIX que l'única cosa que li restava a la física era mesurar amb més precisió les constants de la natura, i declarava la física un camp tancat. És clar que ja s'ha vist que Lord Kelvin no tenia raó.

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 1999
SOBRE EL
PREMI NOBEL D'ECONOMIA
CONCEDIT A
ROBERT A. MUNDELL.
A CÀRREC DE
JORDI CABALLÉ.
DE LA UNIVERSITAT
AUTÒNOMA
DE BARCELONA**

UNA VISIÓ RETROSPECTIVA DE L'OBRA DE
ROBERT MUNDELL

LA CONFERÈNCIA I EL PERSONATGE

El primer desafiament que es troba un conferenciant quan se'l convida a parlar davant d'un auditori és el d'elegir el títol i el to general de la seva conferència. I això passa, fins i tot, quan se li demana que parli d'un tema tan específic com l'obra d'un personatge al qual li acaben de concedir un Premi Nobel. He triat, doncs, un títol que inclogui la paraula *retrospectiva*, perquè intentaré capturar l'esperit del llibre clàssic sobre història del pensament econòmic de Mark Blaug del qual en traduiré el títol original com «Una visió retrospectiva de la teoria econòmica». I quin és aquest esperit que intentaré donar a la meua conferència? Doncs, bàsicament, consistirà a agafar l'obra de l'últim Premi Nobel com una excusa per a presentar-los, des d'un punt de vista acadèmic, l'evolució de l'anàlisi econòmica adreçada a respondre i a estendre les qüestions bàsiques plantejades en la investigació de Robert Mundell. Per tant, en lloc de concentrar-me en el lleugerament estèril exercici d'enumerar la vida i miracles d'una persona recentment canonitzada amb un Premi Nobel, em referiré més a la influència del premiat sobre el desenvolupament posterior de la part de la teoria econòmica a la qual ell ha contribuït amb les seves aportacions seminals.

Tot i així, faré una petita ressenya biogràfica del personatge el motiu pel qual ens hem reunit aquí. Robert Mundell va néixer a Kingston (Canadà) el 1932; va fer estudis de doctorat a la London School of Economics i a l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT), que són dues de les més reconegudes universitats en l'estudi de l'economia a cada banda de l'Atlàntic. Es va doctorar al MIT a l'edat de vint-i-quatre anys amb una tesi sobre els moviments internacionals de capital. Ha estat professor a diferents universitats, entre les quals mencionaré la Universitat de Chicago, d'on va ser professor de 1966 a 1971, i des de 1974 és professor de la Universitat de Colúmbia a Nova York. Durant

el seu període a la Universitat de Chicago va ser editor del prestigiós *Journal of Political Economy*. Finalment, el professor Mundell ha estat assessor d'un gran nombre d'organismes internacionals, com el Fons Monetari Internacional (on va ser membre del seu *staff* de 1961 a 1963), l'ONU, el Banc Mundial i la Comissió Europea, i també de diferents governs de Llatinoamèrica i d'Europa, de la Reserva Federal i del Tresor dels Estats Units i, no cal dir, del Govern del seu país d'origen, Canadà. Destacaria d'entre totes aquestes tasques la d'assessor del comitè monetari de la Comissió Europea l'any 1970 i la de membre del grup d'estudi sobre la unió econòmica i monetària europea als anys 1972-1973. Ha rebut nombroses distincions al llarg de la seva carrera, com el doctorat *honoris causa* per la Universitat de París el 1992, el premi com a membre distingit de l'Associació Americana d'Economia el 1997 i l'admissió com a membre de l'Acadèmia Americana d'Arts i Ciències el 1998. Aquesta impressionant carrera culmina amb la concessió del premi en memòria d'Alfred Nobel pel Banc de Suècia el propassat 13 d'octubre. D'aquesta breu biografia podem fàcilment deduir que ens trobem davant d'un economista amb una doble vessant acadèmica i aplicada, que va ser un brillant estudiant, que es va doctorar a una de les millors universitats del món, sinó la millor (el MIT), que ha estat professor també a una de les millors universitats del món, sinó la millor, en estudis econòmics (la Universitat de Chicago), i que ha col·laborat decisivament amb el seu assessorament en què tots els àmbits transnacionals on s'ha plantejat algun tipus de reforma monetària internacional.

El professor Mundell és autor d'uns cent cinquanta articles, alguns dels quals han estat publicats a les millors revistes d'economia del món, com el *Journal of Political Economy*, el *Quarterly Journal of Economics* i l'*American Economic Review*. Ha escrit quatre llibres, que han estat traduïts a les llengües més importants, entre els quals trobem dos autèntics clàssics: *International Economics* (1968) i *Monetary Theory* (1971), i ha estat editor d'onze llibres: dos d'aquests quals estan actualment en fase d'edició.

El fet que el professor Mundell estigués vinculat durant bastants anys a la Universitat de Chicago va provocar que a les notes de premsa amb motiu de la concessió del Nobel se l'associés inequívocament amb el que es coneix com l'Escola de Chicago, en el sentit, si em permeten l'adjectiu, «friedmanià». És a dir, van tractar-lo com un economista ultraliberal que té una fe cega en les qualitats universalment benèfiques del mercat i de la lliure competència. Crec que aquesta adscripció és clarament excessiva, ja que, si bé Mundell no és tampoc un intervencionista, les seves aportacions tenen un tarannà que no és el del típic ultraliberal de Chicago. Tot i així, s'ha de reconèixer que Mundell es va beneficiar de l'excitant entorn creatiu que des dels anys seixanta és la norma al departament d'economia de la Universitat de Chicago. De fet, mirant la seva obra retrospectivament amb els ulls d'avui, que és el que jo voldria fer, Mundell pot ésser considerat com un «keynesià». Entenc per un keynesià un economista que creu que les polítiques de demanda controlades pel govern poden tenir algun efecte en el nivell del producte interior brut d'un país i, per tant, en el nivell d'ocupació dels treballadors necessaris per a produir-lo. Aquestes polítiques de demanda són bàsicament dues: la política monetària, que consisteix a controlar la quantitat de diner en circulació o els tipus d'interès nominals d'un país, i la política fiscal, que consisteix a controlar el dèficit públic, ja sigui en el seu vessant de despesa pública o d'ingressos per mitjà d'impostos o deute públic.

Els darrers anys d'evolució de la ciència econòmica han posat en qüestió el paradigma keynesià. Deixant de banda les inconsistències lògiques del keynesianisme (a les quals em referiré més endavant), hi ha hagut un corrent generalitzat cap al liberalisme ideològic que ha situat la llibertat i la desregulació dels mercats, així com les polítiques d'oferta, amb especial èmfasi en l'acumulació de capital físic i humà, com les úniques garanties per al creixement econòmic sostingut.

Tot i així, les preguntes plantejades per la investigació de Mundell continuen estant en el centre del debat polític. Un exemple d'això, el tenim en l'actual procés de creació de la Unió

Monetària Europea: la majoria dels arguments utilitzats, ja sigui per donar suport o rebutjar aquest procés d'integració monetària, s'han basat en les contribucions de l'actual Premi Nobel, tal com veurem més endavant.

Dividiré l'obra de Robert Mundell en les grans àrees de recerca en les quals ha estat un investigador capdavanter. Aquestes àrees no tenen la mateixa importància dins de la seva obra, ja sigui mesurant la importància per la rellevància de la seva aportació individual com per les pàgines que ocupen en la seva producció científica. Començaré amb les seves contribucions referides a l'estudi de les polítiques macroeconòmiques en economies obertes. Les aportacions de Mundell en aquesta àrea són les que han tingut més reconeixement, tant acadèmic com en la pràctica econòmica, i per si soles ja justificarien la concessió del Premi Nobel.

MACROECONOMIA INTERNACIONAL

La contribució de Mundell a la macroeconomia internacional va transformar completament aquesta àrea, ja que va delimitar els posteriors desenvolupaments del sistema monetari internacional i es constitueix com la pedra angular en qualsevol discussió sobre els efectes de les polítiques fiscal i monetària sota diferents règims canviaris.

Podem trobar la contribució del professor Mundell, pel que fa a l'estudi dels aspectes internacionals de la política econòmica, en la col·lecció d'articles recollits al seu llibre *International Economics* (1968). El seu model, originalment publicat el 1963 al *Canadian Journal of Economics*, ha esdevingut el que es coneix com el famós model de Mundell-Fleming. El ja desaparegut Marcus Fleming, exdirector del departament de recerca del Fons Monetari Internacional (FMI), i membre d'aquesta institució durant els anys en què Mundell va estar-hi afiliat, va escriure un document de treball de l'FMI al 1962 en què analitzava la mateixa qüestió i arribava, de manera menys elegant, a les mateixes

conclusions que Mundell. Bàsicament, la teoria de Mundell-Fleming permet d'analitzar els efectes de les polítiques d'estabilització fiscal i monetària d'economies petites en les quals hi ha lliure mobilitat de capitals. Això es va aconseguir ampliant el model IS-LM, que el també Premi Nobel John Hicks havia desenvolupat a fi d'il·lustrar més formalment les teories keynesianes. Aquesta ampliació consisteix a introduir el comerç exterior i els moviments de capital a escala internacional. El model captura així la resposta del moviment de capital davant de diferències dels tipus d'interès entre països i la resposta de la balança comercial a les variacions dels tipus de canvi. Amb aquest model ampliat, Mundell va demostrar que els efectes de la política d'estabilització depenen crucialment del règim canviari: si el tipus de canvi és fix, la política fiscal és efectiva, en el sentit que pot contribuir a millores en el nivell d'ocupació laboral i de producció d'un país, mentre que la política monetària és totalment inefectiva. El contrari succeeix quan el tipus de canvi és flexible.

La raó de l'anterior prescripció rau en el fet que el tipus d'interès d'una economia petita està determinat pel tipus vigent a escala mundial quan hi ha mobilitat perfecta dels capitals financers. Si els tipus de canvi són flexibles, un augment en l'oferta de diner dins d'un país provoca una devaluació de la divisa nacional que fa més barates les exportacions i més cares les importacions, la qual cosa acaba provocant una millora del saldo de la balança comercial. Aquest darrer efecte succeeix sempre que la balança comercial reaccioni favorablement davant d'una devaluació, és dir, sempre que se satisfaci un supòsit conegut com *la condició de Marshall-Lerner*. Així, doncs, la millora en el saldo de la balança comercial comporta un augment de la demanda de béns produïts dins del país. Aquest augment de la demanda es traduirà finalment en més producció i, per tant, en menys atur.

Per contra, la política fiscal en forma d'un augment del dèficit públic és totalment inefectiva en aquesta economia. Això és així perquè la demanda generada per aquest dèficit queda contrarestatada per la disminució del saldo de la balança comer-

cial deguda a l'augment de les importacions dels béns demanats tant pel govern com pel sector privat, si aquest últim s'ha beneficiat d'una reducció d'impostos. A més a més, aquesta política de dèficit públic provoca una apreciació de la divisa nacional que consisteix amb l'abans esmentat empitjorament del saldo comercial exterior.

La situació és completament diferent si els tipus de canvi fossin fixos (com passa ara entre els països que formen la Unió Monetària Europea). En efecte, en impedir totalment la fluctuació del tipus de canvi, el govern (o el banc central) perd la capacitat de controlar els agregats monetaris, ja que les entrades i sortides de capitals i de reserves de divises estrangeres determinen quina és la quantitat de diner en l'economia sense que l'autoritat monetària pugui fer res per fixar-la. La política fiscal torna a tenir, doncs, el paper tradicional de la doctrina keynesiana. En efecte, els augments de la despesa pública (o les reduccions d'impostos) tornen a tenir efectes expansius sense ésser anul·lats pel comportament del sector exterior.

El model de Mundell-Fleming va deixar de ser la curiositat acadèmica que era quan es va publicar a mesura que el sistema monetari i financer internacional va anar abandonant el sistema de tipus de canvi fixos i es varen anar liberalitzant els moviments de capital. Aquest procés va culminar a principis dels anys setanta amb la defunció del sistema dissenyat a la conferència de Bretton Woods.

Mundell també va considerar altres versions del seu model en les quals la mobilitat de capital no és tan perfecta i, per tant, es permet certa discrepància entre els tipus d'interès de diferents països. També va considerar situacions en què les economies no són petites pel que fa al seu pes en el mercat internacional de capitals i, per tant, el tipus d'interès no està donat sinó que es determina endògenament en els mercats financers mundials. En aquest cas, la política monetària interna té efectes externs sobre altres països a través del seu efecte sobre els tipus d'interès.

Mundell també va enriquir la seva anterior anàlisi estàtica o de llarg termini, mitjançant consideracions dinàmiques

sobre com es produeix l'ajust d'una economia davant de desequilibris en la balança de pagaments. Per a això es va inspirar en el clàssic mecanisme d'ajust de preus internacionals formulat per David Hume. Mundell va posar èmfasi en les diferències en la velocitat d'ajust, als diferents mercats (això és el que es coneix com el «principi de la classificació efectiva de mercats»).

Sota tipus de canvi fixos, una economia s'ajusta en el temps, ja que els dèficits i superàvits en la balança de pagaments provoquen canvis en l'estoc de diner en circulació (els quals estan vinculats als canvis en les reserves estrangeres). Així, si hi ha friccions en el moviment dels preus dels béns, un augment de l'oferta monetària provoca reduccions en els tipus d'interès i estimula la demanda interna, la qual cosa provoca un dèficit en el sector exterior que ve acompanyat de disminucions de reserves i, per tant, de l'oferta monetària interna. El resultat final és que la balança de pagaments torna a estar en equilibri. Així mateix, durant aquest procés, el nivell de preus intern s'anirà ajustant lentament per tal de fer desaparèixer els efectes de la política monetària. Aquesta anàlisi de la dinàmica monetària constitueix la llavor del que es coneix com «l'enfocament monetari de la balança de pagaments», que ha tingut en Jacob Frenkel i Harry G. Johnson els seus més destacats impulsors.

Evidentment, si tinguéssim tipus de canvi flexibles, els desequilibris a la balança de pagaments provocarien també modificacions en el tipus de canvi, encara que l'ajust de l'economia al llarg del temps estaria governat per les mateixes forces i friccions que abans. En aquest aspecte la contribució de Mundell inauguraria el que es coneix com l'«enfocament monetari del tipus de canvi».

ELS DESENVOLUPAMENTS POSTERIORIS

En aquest punt, ja sembla prou evident per qualsevol coneixedor de l'evolució acadèmica de la macroeconomia internacional que les contribucions de Mundell han estat decisives per als ulteriors

desenvolupaments científics de l'àrea. Totes les preguntes que ell es va plantejar han estat font interminable d'articles que han seguit l'estela dels seus treballs pioners. Tot i així, una mirada a la seva obra sobre macroeconomia internacional amb els ulls d'un economista de principis del segle XXI no pot amagar les limitacions de les seves teories, de les quals en destacaria dues: l'ús del supòsit d'expectatives estàtiques i la falta de fonaments microeconòmics típica dels antics models keynesians.

Respecte al primer punt, que és el del tractament de les expectatives, he de dir que ha estat abordat per contribucions posteriors de gran rellevància teòrica i empírica, entre les quals destaco les de Rudiger Dornbusch i Michael Mussa. Podem adjectivar aquests dos seguidors del magisteri de Mundell com a «neokeynesians». Els neokeynesians són economistes que accepten el realment fructífer supòsit de les expectatives racionals, però ho fan en models en els quals algun tipus d'imperfeció en el mercat de béns o de treball impedeix el seu equilibri a curt o a llarg termini, mitjançant els corresponents ajustos de preus o de quantitats. Al meu entendre, és lloable l'opció neokeynesiana d'acceptar el supòsit de les expectatives racionals, segons el qual les expectatives de les variables endògenes d'un model econòmic són també endògenes i no són més que les esperances matemàtiques de les variables que cal predir d'acord amb les especificacions del mateix model. De manera més concisa, podríem dir que quan hi ha expectatives racionals els valors «expectats» coincideixen amb els valors «esperats» matemàticament. El neokeynesianisme floreix principalment a certes universitats de l'est dels Estats Units, com Harvard i el MIT (fins al punt de ser denominat com a «macroeconomia de la Costa Est»). Els neokeynesians solen ser objecte d'escarni per part dels oradors a les convencions del Partit Republicà dels EUA i també per part dels nous macroeconomistes clàssics (localitzats a certes universitats del *Midwest* nord-americà, com la de Chicago o la de Minnesota). Essent una mica crític amb el neokeynesianisme, però sense arribar als extrems que acabo de citar, he de dir que no crec que siguin gaire satisfactoris alguns intents dels neokeynesians per a

justificar les rigideses que són omnipresents en el seus models. Així, per exemple, justificar rigideses de preus o salaris amb el feble argument dels costos associats a canviar el menú de preus és una manera com una altra de proclamar certa impotència.

Tot i així, el famós model neokeynesià de tipus de canvi de Dornbusch, publicat al *Journal of Political Economy* el 1976, es constitueix per dret propi en un article de referència en la tradició de la investigació inaugurada per Mundell. Bàsicament, Dornbusch volia donar una explicació a les grans oscil·lacions en els tipus de canvi posteriors al col·lapse del sistema de Bretton Woods a principis dels setanta. Recordem que aquestes oscil·lacions han estat moltes vegades perverses, ja que hem vist com s'han apreciat divises de països amb elevats dèficits i una alta inflació. El dòlar, per exemple, es va apreciar un 30% respecte al ien japonès i un 76% respecte del marc alemany des de 1980 a 1985, encara que la taxa d'inflació dels EUA era molt més alta que la de Japó i d'Alemanya i, al mateix temps, a causa de la falta de competitivitat, la balança corrent nord-americana s'encaminava cap a un gran i creixent dèficit. La teoria de Dornbusch ens ve a dir que l'èmfasi per a explicar la determinació dels tipus de canvi s'ha de posar més en els fluxos de capital que en els fluxos comercials. En aquest context, si el capital és perfectament mòbil, els inversors bellugaran les seves carteres amb actius nacionals i estrangers fins que els rendiments totals esperats en cada divisa (que inclouen el seu interès i la depreciació o apreciació esperada de la divisa) s'igualin.

Suposem que un dipòsit en euros doni un 5% d'interès i els dipòsits en dòlars ofereixin un 7%. Si no s'espera que el dòlar variï el seu tipus d'interès, els inversors afavoriran el dòlar, i l'empenyeran cap a una apreciació. El mercat de divises tornarà a estar en equilibri quan el dòlar arribi a un nivell pel qual els inversors esperin que es depreciarà en un 2% en un any respecte a l'euro. És a dir, en aquest model els tipus de canvi es mouen quan ho fan els diferencials dels tipus d'interès o quan ho fan les expectatives sobre els tipus de canvi. Així, mentre que la determinació dels tipus de canvi a llarg termini es pot establir d'acord

amb el model de Mundell-Fleming, els moviments a curt termini estan determinats quasi exclusivament pels tipus d'interès i per les expectatives. Aquest enfocament permet a Dornbusch explicar per què els tipus de canvi «sobrereaccionen», és a dir, per què són tan volàtils.

Tal com ja he dit, les expectatives en el model de Dornbusch es formen racionalment utilitzant tota la informació sobre esdeveniments futurs, incloent-hi una visió (o model) de les forces fonamentals que determinen els tipus de canvi. D'altra banda, com a bon neokeynesià, Dornbusch introdueix les típiques rigideses a curt termini de preus i salaris, i ens trobem que les conseqüències de tot aquest còctel són espectaculars. En efecte, suposem que la reserva federal dels Estats Units expandeix de manera sobtada la seva oferta monetària. Gràcies a Mundell, sabem que a llarg termini el dòlar es deprecia. A curt termini, però, el quadre és molt més interessant. Després de l'augment de l'oferta monetària, els preus no s'ajusten immediatament, la qual cosa provoca que tot l'ajust al mercat monetari l'hagin de suportar els tipus d'interès nominals i, per tant, aquests experimenten una forta davallada instantània. Què passa amb els tipus de canvi? Com que els inversors tenen expectatives racionals, saben que el dòlar es deprecia a llarg termini. A causa d'aquesta depreciació esperada els inversors requeriran uns tipus d'interès més elevats per tal de continuar invertint en dòlars. Però, tal com acabo d'explicar, els tipus d'interès són, per contra, de moment més baixos del que eren al principi. Per tal de restaurar l'equilibri, el dòlar s'ha de depreciar a un nivell més baix que el del seu valor d'equilibri, fins a un punt en el qual s'espera una apreciació. Llavors, els inversors continuaran invertint en dòlars, ja que l'apreciació esperada els compensa del període de transició amb tipus d'interès baix. Per tant, en aquest cas, el dòlar experimenta una excessiva devaluació a curt termini. Per contra, una inesperada restricció monetària (que provocaria una pujada del tipus d'interès) funcionaria de manera simètrica. En aquest darrer cas, el dòlar se «sobrepregia» fins al punt que la depreciació esperada compensaria l'augment dels tipus d'interès.

Així, doncs, el model de sobreacció del tipus de canvi permet d'explicar, encara que parcialment, espectaculars fluctuacions de divises històriques com l'apreciació del dòlar des de 1980 a 1984 com a conseqüència de la política restrictiva de la reserva federal al bienni 1979-1980 sota la presidència de Ronald Reagan.

El fenomen de la sobreacció del tipus de canvi ha reduït l'entusiasme pel mecanisme canviari basat en tipus de canvi flexibles tenint en compte el risc que s'afegeix a les transaccions comercials internacionals. Aquesta sobreacció no és fruit de cap ineficiència del mercat de divises, sinó que, al contrari, és conseqüència de la seva extrema eficiència, la qual cosa contrasta amb la ineficiència dels mercats de béns i de treball. Malgrat aquesta volatilitat, el mateix Dornbusch en escrits posteriors declara que prefereix els tipus de canvi flexibles, ja que considera que moltes de les crítiques contra la fluctuació lliure de divises no són més convincents que les queixes del conductor begut que, després de xocar i destrossar el cotxe, dóna la culpa al mal estat de les carreteres.

El model que he intentat, no sé si amb gaire èxit, explicar també ens ofereix un resultat addicional: la política activa de dèficit públic no provoca sobreacció de divises i, per tant, les polítiques macroeconòmiques basades en el control dels actius monetaris són les responsables principals dels moviments massius de capital i de la inestabilitat financera. Cal dir respecte a això, que els intents ocasionals per estabilitzar els tipus de canvi, com per exemple després de l'Acord del Louvre de 1987, han fallat perquè els objectius (i els corresponents instruments) de la política econòmica dels potencials estabilitzadors eren incompatibles (alguns perseguïen l'equilibri intern i altres l'equilibri extern) i, per tant, no eren coordinables.

Finalment, assenyalo que aquests models amb rigideses temporals o permanents en alguns mercats utilitzen, de fet, l'abans esmentat «principi de classificació efectiva de mercats» suggerit ja pel mateix Mundell a l'hora de caracteritzar el procés d'ajust macroeconòmic. Aquests tipus de models també s'han

utilitzat per explicar la volatilitat excessiva de les cotitzacions dels actius financers com a resposta a *shocks* monetaris, tal com va fer un altre keynesià il·lustre com és Olivier Jean Blanchard a un article a l'*American Economic Review* de 1981.

Pel que fa al segon punt problemàtic de l'anàlisi de Mundell, he de dir que la teoria de Mundell-Fleming pot ésser adaptada a models amb fonaments microeconòmics rigorosos en què es fan explícites les decisions intertemporals de les empreses i de les economies domèstiques. No fer explícites aquestes consideracions essencials i distintivament econòmiques comporta reduir un model econòmic a un sistema d'equacions que s'obtenen a partir d'intuïcions poc fonamentades, d'una evidència empírica casual o de la més pura arbitrarietat. En tot cas, aquestes equacions no provenen de decisions maximitzadores dels agents econòmics racionals. Una vegada tenim aquest sistema *ad hoc* d'equacions, l'estudi d'estàtica comparativa és un pur estudi de càlcul en el qual, aplicant l'instrument matemàtic del teorema de la funció implícita, podem obtenir els multiplicadors, és a dir, els efectes de canvis en les variables exògenes del sistema sobre les variables endògenes. Evidentment, l'únic que hem de fer abans de procedir a l'anàlisi és identificar quines variables del sistema són exògenes i quines són endògenes. Per exemple, a diferència del que passa en el model IS-LM tradicional, en el model de Mundell-Fleming el tipus d'interès deixa de ser una variable endògena, ja que ve donat pel tipus d'interès mundial. Per tant, ens trobem amb la necessitat d'introduir una nova variable endògena per igualar el nombre d'equacions amb el de variables endògenes. Quan el tipus de canvi és flexible, aquest es converteix en la nova variable endògena que necessitem. D'altra banda, quan el tipus de canvi és fix, llavors l'oferta monetària passa a ser endògena perquè està condicionada a les operacions de defensa de la divisa mitjançant les corresponents operacions amb reserves.

Queda clar, doncs, que l'exercici matemàtic que acabo de descriure té molt poc contingut econòmic. Per contra, aquest contingut econòmic s'assoleix quan es fan explícits els problemes

de maximització dels individus i de les empreses, i les corresponents equacions d'equilibri als diferents mercats de béns, d'actius financers, de divises, etc. En definitiva, d'aquesta manera faríem honor a la ja clàssica definició de Lionel Robbins segons la qual l'economia tracta de l'assignació de béns escassos que es poden utilitzar de maneres alternatives.

Ja he dit que la teoria de Mundell-Fleming, així com les seves seqüeles, poden integrar-se en un context típic d'equilibri general i s'ha de reconèixer que gran part dels seus resultats sobreviuen a aquesta modelització. Citaré només la que és, possiblement, l'excepció més remarcable: en contextos d'equilibri general amb agents maximitzadors, contràriament al que va obtenir Mundell, el dèficit públic provoca devaluacions de la divisa nacional, i no apreciacions. De fet, aquest era el resultat empíricament més discutible del model de Mundell-Fleming i, per tant, cal assenyalar que els models moderns del que es coneix com «la nova macroeconomia oberta» permeten d'obtenir un resultat clarament reconciliable amb l'evidència empírica. El recent llibre de Maurice Obstfeld i Kenneth Rogoff sobre fonaments de la macroeconomia internacional de 1996 comté una anàlisi detallada dels efectes de les polítiques d'estabilització considerades per Mundell, quan s'utilitzen models ben fonamentats microeconòmicament.

TIPUS DE CANVI FLEXIBLES O FIXOS?

La investigació de Mundell que acabo de descriure planteja de manera natural als economistes posteriors la pregunta sobre els avantatges i els inconvenients dels diferents règims canviaris. Quina resposta han donat els economistes teòrics posteriors a Mundell a la qüestió sobre quin sistema és «millor»: el de tipus de canvi fixos o el de tipus flexibles? Davant d'aquesta pregunta qualsevol economista sensat hauria de respondre que depèn. Evidentment, amb aquesta resposta tan humil, l'economista en qüestió haurà perdut tota possibilitat de ser convidat a

qualsevol tertúlia d'un programa d'opinió radiofònic o televisiu. Tot i així, un cop pagat ja aquest peatge, haurà d'intentar formular un model que li permeti de visualitzar les diferents forces que originen la volatilitat dels tipus de canvi i de les variables que influeixen en el benestar dels individus. Per aquest objectiu, podria intentar adaptar al seu problema el clàssic article de William Poole publicat al *Quarterly Journal of Economics* al 1970, que intentava avaluar quin instrument de política monetària (oferta monetària o tipus d'interès nominals) és més adequat per minimitzar les indesitjables fluctuacions del PIB. Afegint al model de Poole el sector exterior, la condició d'arbitratge en el mercat de divises del model d'expectatives racionals de Dornbusch i dues possibles fonts de perturbació al sistema, associades a *shocks* monetaris i a *shocks* reals de demanda de béns, podem respondre a la qüestió plantejada. El «depèn» de la primera resposta se substanciaria dient que, quan els *shocks* són reals (deguts, per exemple, a un inesperat canvi de preferències o de demanda exterior), llavors el sistema de tipus de canvi flexible és més desitjable ja que les fluctuacions del tipus de canvi permeten d'absorbir parcialment aquests *shocks*. Per contra, si els *shocks* són monetaris (deguts, per exemple, a canvis inesperats en la política monetària o en les necessitats de liquidesa dels consumidors), llavors el tipus de canvi fix anul·la tota possible fluctuació, ja que l'endogeneïtat de l'oferta monetària sota aquest règim permet absorbir totalment les perturbacions monetàries.

Per acabar amb les línies d'investigació que han sorgit com a conseqüència del treball pioner de Mundell, i sense voler ser de cap manera exhaustiu, em voldria referir al problema de credibilitat associat al sistema de tipus de canvi fix. Aquest problema qüestiona, fins i tot, la viabilitat universal d'aquest sistema canviari. Recordem que, quan els tipus de canvi són fixos, el banc central de cada país es compromet a intervenir en el mercat de divises, comprant-ne o venent-ne, per tal de mantenir la cotització de la divisa nacional. Alguns autors, entre els quals citaré l'excel·lent economista i divulgador Paul Krugman en un article de 1979 al *Journal of Money, Credit and Banking*, van

assenyalar que un país pot estar perdent reserves de manera continuada per raons estructurals. Per tant, la divisa nacional estaria sobrevalorada respecte al seu valor d'equilibri. Si tot segueix igual, el país en qüestió acabarà perdent totes les seves reserves de divises i, quan això passi, el sistema de tipus de canvi fix haurà de ser abandonat i la divisa nacional es començarà a devaluar. Preveient que això passarà, els especuladors voldran adquirir anticipadament totes les reserves de divises estrangeres del govern, i aquesta crisi de la balança de pagaments succeirà abans que el govern exhaurixi totes les seves reserves en cas que no hi hagués especulació. Això passa perquè els especuladors tenen expectatives racionals i no poden permetre's el luxe d'esperar fins que les reserves s'exhaureixin i, llavors, de veure com les seves posicions en moneda nacional perden valor instantàniament en el moment del canvi de règim com a conseqüència de la modificació instantània d'expectatives sobre la depreciació de la divisa. Els especuladors racionals el que faran és «atacar» la divisa del país amb problemes canviaris, desfaran les posicions en la divisa problemàtica i adquiriran posicions en les divises fortes estrangeres abans de l'exhauriment de reserves. El resultat de l'atac especulatiu és un col·lapse anticipat del règim canviari.

Diferents episodis de sobtats atacs especulatius contra divises europees, com la lliura esterlina, abans de la implantació de l'euro i sota un sistema de tipus de canvi semifixos (o flexibles amb bandes de fluctuació) com era el del sistema monetari europeu, il·lustren ben gràficament la validesa de l'anàlisi teòrica de les crisis de les balances de pagaments.

LA MONEDA ÚNICA

Mundell també va ser un pioner a l'hora de plantejar-se els avantatges i els inconvenients de les zones amb un moneda comuna. Això ho va fer en el seu article sobre àrees de divises òptimes de l'any 1961 que va ser publicat a l'*American Econo-*

mic Review. Vull insistir que és especialment meritori que, en una època en la qual el sistema de tipus de canvis fixos de Bretton Woods predominava a l'economia internacional, Mundell es preguntés sota quines circumstàncies té avantatges que un conjunt de països renunciïn a la seva sobirania monetària en favor d'una moneda única. La llista d'avantatges és ben coneguda i Mundell les va enumerar succintament: costos de transacció més baixos i menys incertesa en els preus relatius. Per contra, la llista d'inconvenients necessita més elaboració. El manteniment de la plena ocupació quan hi ha *shocks* de demanda o d'oferta asimètriques, és a dir, específics de cada país, requereix una reducció real de salaris als països afectats. Mundell va posar èmfasi en la importància de l'alta mobilitat del treball per poder compensar aquestes perturbacions. De fet, Mundell caracteritza les àrees òptimes amb un moneda única com aquell conjunt de regions i països pels quals la propensió a emigrar és suficientment alta com per assegurar la plena ocupació quan una d'aquestes regions o països s'enfronta a un *shock* asimètric. L'anàlisi de les àrees amb moneda comuna va ser posteriorment desenvolupat per Robert McKinnon i Peter Kenen, els quals varen identificar criteris addicionals per a aquestes àrees òptimes, com són la lliure mobilitat de capitals o sistemes fiscals comuns.

113

No cal dir que l'anàlisi de Mundell va cridar l'atenció en relació amb els plans per introduir la moneda comuna europea. Els investigadors que han examinat els avantatges i desavantatges de la Unió Monetària Europea han adoptat com a punt de partida el treball de Mundell. De fet, el problema de la falta de mobilitat laboral davant de *shocks* asimètriques ha estat un dels arguments més utilitzats pels detractors del nou sistema. Si em permeten una opinió personal, crec que, davant del catastrofisme d'aquests detractors situats majoritàriament a l'altra banda de l'Atlàntic, s'ha de manifestar amb igual rotunditat que la resposta a la falta de mobilitat laboral a Europa, que contrasta amb l'alta mobilitat als Estats Units, no rauria en la no introducció de l'euro (cosa ja impensable avui en dia), sinó en la creació de les circumstàncies que possibilitin un autèntic espai econòmic comú

com el constituït pels Estats Units. Per tant, hauríem de confiar en l'euro com a aglutinador d'aquest vertader espai europeu sense barreres per a les mercaderies i les persones i, d'altra banda, hauríem d'invertir en tot allò que faci possible aquest espai comú: canvis culturals, creació d'una consciència europea i un estímul al coneixement operatiu de les llengües estrangeres. Això últim és especialment rellevant en un país com Espanya, on l'important retard educatiu pel que fa a l'aprenentatge de les llengües estrangeres és un vertader obstacle per a la integració real a l'espai europeu.

Dins d'aquesta àrea de l'anàlisi econòmica, el mateix Mundell ha contribuït recentment al debat. En els seus últims articles, com els publicats l'any 1998 al *Wall Street Journal*, Mundell ha posat èmfasi en els elements polítics (i, per tant, no racionalitzables en termes estrictament econòmics) de la Unió Monetària Europea i en els efectes benèfics que aquesta unió pot portar a països del club mediterrani en termes d'estabilitat econòmica gràcies a l'Acord de Maastricht i al posterior Pacte per a l'Estabilitat aprovat pels països de la Unió Europea.

A més a més, també defugint de tot pessimisme, ja va predir a principis de 1997, en un article a l'*American Economic Review*, que Espanya, Portugal i Itàlia ingressarien sense problemes a la Unió. També va predir que si Grècia aconseguia abaixar els seus tipus d'interès (que estaven al voltant del 12%) als nivells dels altres països europeus, llavors, gràcies a la disminució de la factura dels interessos del deute públic (el qual estava al voltant del 110% del PIB grec), el dèficit públic de Grècia se situaria a nivells propers al 4% del seu PIB, molt a prop de l'objectiu de convergència. No cal dir que els esdeveniments a partir de 1997 no han fet altra cosa que donar la raó al nostre premiat economista. ...

Mundell dóna a la creació de l'euro (del qual es considera padrí, però no pare) una importància decisiva per a l'evolució futura del sistema monetari internacional. Com a prova d'això, en una conferència que va pronunciar al St. Vincent College de Pennsilvània al 1997 va dir el següent: «Bismarck va afirmar en

una ocasió que l'esdeveniment més important del segle XIX va ser que Anglaterra i Amèrica acabessin parlant la mateixa llengua. En el mateix esperit, l'esdeveniment més important del segle XX va ser la creació del Sistema de la Reserva Federal, el vehicle que ha permès la difusió universal del dòlar. Sense la creació de la Reserva Federal cap dels esdeveniments monetaris posteriors s'haguessin produït. Esperem que el fet més important dels segle XXI sigui que el dòlar i l'euro aprenguin a conviure junts».

COMERÇ INTERNACIONAL

Breument mencionaré que, en l'àrea del comerç internacional, Mundell en un dels seus primers articles també a l'*American Economic Review* de l'any 1957 va estendre el resultat de Heckscher-Ohlin sobre igualació de les retribucions als factors quan hi ha lliure comerç. Mundell va demostrar al seu article que, quan hi ha barreres comercials, la mobilitat del treball i del capital són substituïts perfectes del lliure comerç de béns en el sentit que la producció i el consum globals serien els mateixos en els dos casos. Una conseqüència de la seva anàlisi és que les barreres comercials acaben estimulants la mobilitat dels factors productius quan aquesta mobilitat és possible.

115

EFFECTES DE LA POLÍTICA MONETÀRIA

En aquest darrer bloc d'investigació, Mundell sempre ha estat interessat pel paper de la política monetària com a instrument de regulació econòmica. La visió de Mundell sobre la política monetària la podem trobar resumida en el seu llibre *Monetary Theory* de 1971, que està traduït al castellà.

Quasi al mateix temps que un altre Premi Nobel de tarannà molt keynesià, James Tobin, Robert Mundell va presentar en un article al *Journal of Political Economy* de 1963 un model sobre els efectes de la política monetària. Segons el seu

model, quan el govern devalua el valor de la moneda nacional mitjançant l'expansió monetària i la seva inflació associada. L'estalvi privat es desplaça dels actius monetaris (que han perdut atractiu com a dipòsit de valor) als actius productius. Això provoca un augment de la inversió i, per tant, de la producció i de l'ocupació. Aquest efecte expansiu de la política monetària es coneix amb el nom d'*efecte Mundell-Tobin*.

L'efecte Mundell-Tobin ha estat objecte d'un gran debat teòric i empíric en la professió acadèmica. Evidentment, tot model monetari que consideri el diner només com un actiu que serveix per acumular riquesa, generarà un resultat com el prescrit per Mundell i Tobin. És a dir, l'augment de la taxa de creixement monetari es traduirà en un efecte expansiu sobre el PIB.

Ara bé, oposadament al que passa amb la política fiscal, en la qual l'objecte d'estudi està ben delimitat (tothom sap què és la despesa pública, què són els impostos i què és el deute públic), l'objecte d'estudi de la política monetària és molt més difús. En particular, les preguntes, què és el diner? o, per què es fa servir? continuen generant discussions dins de la professió dels economistes. El més greu és que, depenent de la resposta que donem a les anteriors preguntes, els efectes de la política monetària seran diferents. Això queda agreujat pel fet que s'ha de ser extremadament precís quan definim una determinada política monetària. No és el mateix un augment d'una vegada i permanent de l'estoc de diner en circulació (la qual cosa, contràriament al que diu el típic model keynesià, no té cap efecte real en un context d'equilibri general, ja que els efectes són purament nominals), que un augment de la taxa de creixement de l'oferta monetària introduïda en el sector privat mitjançant transferències, o que l'emissió de diner per finançar la despesa pública. Aquesta última pràctica, que es coneix amb el nom de *senyoratge*, està prohibida ara a la Unió Europea, i significa l'ús del monopoli en l'emissió de diner per part del govern amb la finalitat de fer front a les pròpies despeses. El *senyoratge* és, però, un instrument molt popular en països en els quals la ineficiència del sistema fiscal per extraure recursos a través dels impostos, ja

sigui pel seu disseny incorrecte o per la inoperància dels mecanismes d'inspecció, obliga els governs a confiar en l'emissió de diner per finançar la seva despesa. Les històriques experiències hiperinflacionistes a països d'Amèrica del Sud o, més recentment, a Rússia estan ben presents en l'història tràgica d'aquesta perversa política monetària.

Si ens limitem només a la política monetària més pura, que és la considerada per Mundell i Tobin, i que consisteix a variar la taxa d'expansió monetària sense incórrer en *seigniorage*, hem de dir que els resultats de les investigacions posteriors han estat d'una gran confusió teòrica. Considerem, per exemple, què passaria si eliminéssim la funció del diner com a dipòsit de valor, la qual cosa és lògica si tenim en compte l'existència d'altres actius financers amb un interès nominal positiu que clarament domina l'interès nominal nul del diner. Per tant, concentrem-nos en la funció del diner com a mitjà d'intercanvi. Sense ser exhaustiu, puc citar el treball clàssic del prematurament mort economista argentí Miquel Sidrauski que, en un article extret de la seva tesi doctoral a la Universitat de Chicago i publicat a l'*American Economic Review* al 1967, demostrava que, si els saldos reals de diner augmenten la felicitat dels individus perquè faciliten les transaccions comercials, llavors els canvis en la taxa d'expansió monetària no tenen efectes a llarg termini sobre el producte interior d'un país. Aquest resultat es coneix com el de la «superneutralitat» del diner. Posteriorment, Stanley Fischer (que és actualment un dels màxims dirigents del Banc Mundial) va demostrar en un article a *Econometrica* el 1979 que aquesta política monetària sí que té efectes a curt termini.

Per acabar d'enterbolir el panorama, diré que el model monetari més popular avui en dia és el model que justifica l'existència del diner per restriccions de liquidesa que obliguen als agents a comprar mitjançant diner en efectiu certs béns de consum. Aquests béns que no es poden comprar a crèdit solen ser aquells que no es poden hipotecar com a garantia de pagament (pensem en les dificultats que tindríem per comprar un gelat a crèdit). Aquest model, també conegut per la seva denominació

anglesa de «model de *cash-in-advance*», ens dóna com a resultat més notable que l'anterior superneutralitat aplica tant a llarg com també a curt termini.

Permetin-me rematar aquesta visió tan contradictòria dels efectes de la política monetària amb una mitja verònica, consistent a assenyalar que, si la restricció de liquidesa que obliga a fer compres mitjançant diner en efectiu i no a crèdit s'estengués també als béns que constitueixen el capital productiu d'un país, l'efecte Mundell-Tobin canviaria radicalment de signe. Això pot passar en economies amb sistemes monetaris i financers molt poc desenvolupats on les compres de capital s'han de fer «al comptat». En aquest cas, la inflació generada per l'expansió monetària actua com un impost sobre la inversió productiva, ja que aquesta inversió es materialitza mitjançant l'adquisició de capital amb diner, el qual és un actiu que pateix la devaluació provocada per la política inflacionista. Així, doncs, un increment en la taxa de creixement del diner en circulació es traduiria ara en una reducció del PIB.

Queda clar doncs que, si bé l'anàlisi de Mundell-Tobin és rellevant, de cap manera pot agafar-se com una caracterització absoluta dels efectes de la política monetària. Encara avui en dia ens fa falta fer molta investigació sobre les funcions del diner i, sobretot, sobre els mecanismes de transmissió monetària.

118

ÚLTIMES LLIÇONS

Tal com ja he dit quan m'he referit a la polèmica sobre l'euro, en els seus escrits recents, Mundell ha defugit de tot dogmatisme i ens obsequia, per contra, amb una gran capacitat per estudiar els problemes des de diferents punts de vista, no solament econòmics. No sabria dir si això és fruit de l'edat, però en tot cas és sorprenent en una professió en la qual, segons l'encertada definició de l'escriptor mexicà Carlos Fuentes, les opinions personals intenten imposar-se a cops de xifres. Si més no, aquesta actitud hauria de servir de lliçó als economistes, ja siguin liberals o

intervencionistes, que sempre estan venent la mateixa i, segons ells, infal·libre recepta màgica.

En els seus darrers escrits, a part de parlar de la Unió Monetària Europea, Mundell ens ofereix simultàniament les lliçons d'història i de prospectiva a les quals és tan aficionat. Així, ens ha obsequiat en un article de l'any 1998 amb una meravellosa història del diner agafant com excusa la llei de Gresham. Thomas Gresham va ser un conseller de la reina Isabel I d'Anglaterra que va afirmar que «el diner bo i el diner dolent no poden circular simultàniament». Mundell es planteja quin tipus de diner ha desplaçat a l'altre al llarg de la història i això ens permet de gaudir d'una història monetària que va des de la Guerra del Peloponès al segle IV abans de Crist a l'actual preponderància del dòlar, passant per la Roma imperial, l'Anglaterra isabelina i el període bimetal·lic als Estats Units del segle passat en el qual coexistien l'estàndard or i l'estàndard plata. D'altra banda, en altres articles recents, com un del 1997 sobre el paper futur de l'or en el sistema monetari internacional o un altre del 1994 en què compara el sistema de Bretton Woods amb el sistema monetari europeu dels anys noranta, ens demostra el seu exhaustiu coneixement de l'entorn econòmic internacional i de les polítiques econòmiques de molts països concrets.

Passant a l'apartat de valoracions globals, crec que l'aspecte més destacat de l'obra de Mundell és que els seus treballs principals van produir-se en un entorn en el qual el sistema monetari internacional era molt diferent del que avui coneixem. En canvi, les seves contribucions continuen estant en el centre dels ensenyaments de macroeconomia internacional a totes les facultats del món, han inspirat a generacions d'economistes i dominen en l'anàlisi dels aspectes més pràctics de les economies obertes. Veiem, doncs, com Mundell va tenir una rara habilitat per elegir temes d'estudi que anticipaven els esdeveniments futurs del sistema monetari i financer internacional.

Insisteixo sobre el caràcter inicialment teòric de la recerca de Mundell perquè qui els parla és membre d'una professió, la d'investigador en economia moderna, que és objecte de nombro-

ses desqualificacions per part dels que no la practiquen. És ja un crítica comuna a l'economia moderna feta pels que no s'hi senten còmodes que la matèria d'estudi ha esdevingut excessivament matemàtica i que la distància entre els models i la «realitat» cada vegada augmenta més. Voldria en aquest punt citar l'informe del Banc de Suècia en el qual justifica la concessió del Nobel a Mundell. Diu l'informe: «Les contribucions de Mundell serveixen com una excel·lent il·lustració del valor de la investigació bàsica. En un moment donat del temps, els descobriments acadèmics poden semblar bastant esotèrics; no gaire temps després, però, poden adquirir una gran importància pràctica». En definitiva, crec que plantejar-se als anys seixanta preguntes sobre els tipus de canvi flexibles o sobre cessions de sobirania per crear monedes comunes, provocava els mateixos comentaris despectius que avui provoquen altres investigacions aparentment poc aplicades i que provenen d'aquells pels qui la divisió radical entre economia teòrica i aplicada forma part tant del seu argumentari com del seu imaginari.

Mundell ha estat un economista d'una gran activitat acadèmica i com a prova d'això, tal com ja he dit, és que ha escrit més d'un centenar d'articles sobre els diferents aspectes de la política macroeconòmica i de l'economia internacional que han estat publicats a les revistes d'economia més prestigioses. La seva productivitat investigadora és, sense cap mena de dubte, un exemple per a les generacions posteriors d'economistes.

Aquesta immensa obra escrita, que arriba fins al present, em permet d'extreure l'última lliçó de l'economista Mundell per a un país com el nostre en el qual històricament alguns dels que han estat considerats grans economistes, o almenys han tingut una gran projecció pública, han deixat una obra escrita escassa i, en alguns casos, inexistent. Per contra, Robert Mundell, que avui és considerat com un economista que ha analitzat qüestions de gran rellevància pràctica, ha deixat prova documental del seu magisteri sotmetent la seva investigació més reconeguda (la qual es desenvolupa a la dècada dels seixanta) al veredict de dels avaluadors anònims de les millors revistes perquè siguin jutjades pel

seus col·legues. Així va obtenir la certificació de qualitat que només l'aprovació d'altres reconeguts membres de la comunitat acadèmica atorga.

La falta de costum a sotmetre la nostra recerca en economia a la consideració dels nostres col·legues de la comunitat científica internacional (la qual és l'única comunitat vàlida de referència) s'està superant. Fa uns anys era una excepció trobar economistes d'universitats catalanes que tinguessin publicacions en revistes reconegudes i els pocs que ho feien, analitzaven qüestions molt teòriques, encara que de cap manera menyspreables. Crec que tots hem de reconèixer el mèrit d'aquests investigadors pel seu caràcter pioner.

En canvi, en els darrers deu anys ja és molt habitual trobar el nom d'economistes d'universitats espanyoles i, especialment, d'universitats catalanes referenciats als llistats de les revistes internacionals més prestigioses. A més a més, alguns d'aquests economistes estan considerats primeres figures a escala mundial en àrees tan aplicades com l'organització industrial o la mateixa macroeconomia. Tot i així, el camí que ens queda per recórrer a fi d'estendre aquesta actitud d'internacionalització i d'exigència intel·lectual a totes els centres de Catalunya on hi ha economistes acadèmics és encara llarg. En tot cas, la magnitud de l'obra de Mundell ens ha de servir com un far que ens indiqui clarament on està el rumb cap a l'excel·lència acadèmica.

REFERÈNCIES

- BLANCHARD, O. J. (1981). «Output, the Stock Market, and Interest Rates». *American Economic Review*, núm. 71, p. 132-143.
- DORNBUSCH, R. (1976). «Expectations and Exchange Rate Dynamics». *Journal of Political Economy*, núm. 84, p. 1161-1176.
- FISCHER, S. (1979). «Capital Accumulation on the Transition Path in a Monetary Optimizing Model». *Econometrica*, núm. 47, p. 1433-1439.
- FLEMING, J. M. (1962). «Domestic Financial Policies under Fixed and under Floating Exchange Rates». *International Monetary Fund Staff Papers*, núm. 9, p. 369-379.
- KRUGMAN, P. (1979). «A Model of Balance of Payments Crises». *Journal of Money, Credit and Banking*, núm. 11, p. 311-325.
- MUNDELL, R. A. (1957). «International Trade and Factor Mobility». *American Economic Review*, núm. 47, p. 321-355.
- (1961). «A Theory of Optimum Currency Areas». *American Economic Review*, núm. 51, p. 657-665.
- (1963a). «Capital Mobility and Stabilization Policy under Fixed and Flexible Exchange Rates». *Canadian Journal of Economics*, núm. 29, p. 475-485.
- (1963b). «Inflation and Real Interest». *Journal of Political Economy*, núm. 71, p. 280-283.
- (1968). *International Economics*. Nova York: Macmillan.
- (1971). *Monetary Theory*. Pacific Palisades: Goodyear.
- (1994). «The European Monetary System 50 Years after Bretton Woods: A Comparison Between Two Systems». *Monte dei Paschi di Siena*. Siena.
- (1997a). «The International Monetary System in the 21st Century: Could Gold Make a Comeback?». *Center for Economic Policy Studies, St. Vincent College*. Latrobe, PA. [Manuscript]
- (1997b). «Currency Areas, Common Currencies, and EMU». *American Economic Review [Papers and Proceedings]*, núm. 87, p. 214-216.

- MUNDALL, R.A. (1998a). «Great Expectations for the Euro: Part I». *Wall Street Journal* (24 març).
- (1998b). «Great Expectations for the Euro: Part II». *Wall Street Journal* (25 març).
- (1998c). «Making the Euro Work». *Wall Street Journal* (30 abril).
- (1998d). «Uses and Abuses of Gresham's Law in the History of Money». [Manuscript, per a publicació a *Zagreb Journal of Economics*]
- OBSTFELD, M.; ROGOFF, K. (1996). *Foundations of International Macroeconomics*. Cambridge, MA: MIT Press.
- POOLE, W. (1970). «Optimal Choice of Monetary Policy Instruments in a Simple Stochastic Macro Model». *Quarterly Journal of Economics*, núm. 84, p. 197-216.
- SIDRAUSKI, M. (1967). «Rational Choice and Patterns of Growth in a Monetary Economy». *American Economic Review*, núm. 57, p. 534-544.

