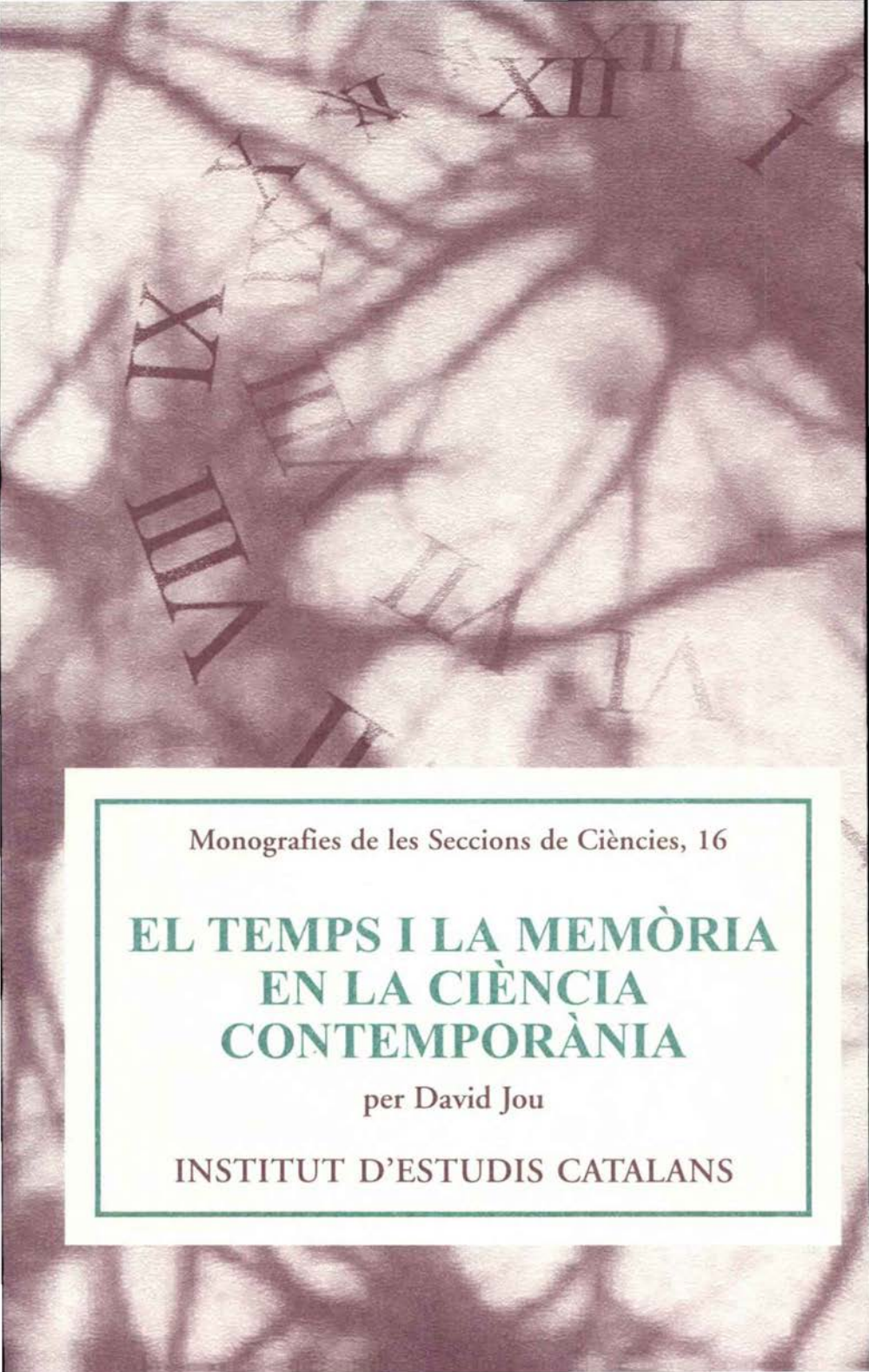


The background of the book cover features a dense, overlapping pattern of Roman numerals in various sizes and orientations, set against a backdrop of thin, dark, branching lines that resemble tree limbs or a complex network. The overall color palette is a range of earthy browns, from light tan to deep, dark chocolate and near-black tones.

Monografies de les Seccions de Ciències, 16

**EL TEMPS I LA MEMÒRIA
EN LA CIÈNCIA
CONTEMPORÀNIA**

per David Jou

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES

- 1. OBRA D'EVARISTE GALOIS**
a cura d'A. Malet
- 2. INTRODUCCIÓ A LA
TERMODINÀMICA DE
PROCESSOS BIOLÒGICS**
D. Jou
- 3. ANÀLISI DE LA
PSICOANÀLISI**
L. Garcia i Sevilla
Pròleg de M. Brunge
- 4. COMPENDI DE
NOMENCLATURA DE
QUÍMICA ANALÍTICA**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 5. VOCABULARI
FORESTAL**
Eduard Parés i Español
- 6. PLASMES I FOCS**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 7. GLOSSARI DE CORROSIÓ**
a cura de J. M. Costa
i P. L. Cabot
- 8. GASOS I ATMOSFERES**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 9. TERRA I SÒL**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 10. LÍQUIDS I BIOFLUIDS**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret

**EL TEMPS I LA MEMÒRIA
EN LA CIÈNCIA CONTEMPORÀNIA**

This One



QBK2-CLW-LOS3

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

Monografies de les Seccions de Ciències, 16

SECCIÓ DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA

**EL TEMPS
I LA MEMÒRIA
EN LA CIÈNCIA
CONTEMPORÀNIA**

DAVID JOU

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS
BARCELONA, 2001

Jou i Mirabent, David

El Temps i la memòria en la ciència contemporània. —

(Monografies de les seccions de ciències ; 16)

Bibliografia

ISBN 84-7283-586-3

I. Institut d'Estudis Catalans II. Títol

III. Col·lecció: Monografies de les seccions de ciències ; 16

1. Ciència — Filosofia 2. Memòria (Filosofia) 3. Temps

001.1

Disseny gràfic: Maria Casassas

© David Jou i Mirabent

© 2001, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: octubre de 2001

Tiratge: 450 exemplars

Text revisat lingüísticament pel Servei de Correcció de l'IEC

Compost per fotocomposició gama, s. l.

Carrer d'Aristides Maillol, 3, 1r. 08028 Barcelona

Imprès a Limpergraf, SL

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

ISBN: 84-7283-586-3

Dipòsit Legal: B. 33124-2001

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

PRÒLEG

El temps i la memòria, o bé el fluir i la permanència, o, encara, l'esdevenir i l'ésser, o l'eternitat de Déu i la fugacitat del món: el conflicte i la complementarietat entre aquests dos aspectes de la realitat i de la vida és una de les més velles qüestions filosòfiques, científiques i teològiques i una de les més riques fonts literàries i artístiques. Tot i que la ciència hagi anat relaxant el seu vincle amb la filosofia, tan estret en una etapa inicial, moltes de les qüestions plantejades per aquesta beuen encara de la primera i, recíprocament, algunes de les descobertes de la ciència inspiren noves preguntes filosòfiques. La ciència pot ser entesa des de moltes perspectives diferents; alguns dels conceptes més arrelats en la història del pensament inviten especialment a fer-ho: el temps i la memòria, que tractem en aquest llibre, la matèria, que vam tractar en una obra anterior (*Matèria i materialisme*, Institut d'Estudis Catalans, 1997, Edicions La Magrana, 1999), l'espai, el zero i l'infinit, la vida... Aquesta reflexió té, per al científic, l'atractiu de la novetat mental, i el força a ampliar els seus coneixements en veure com, des d'una determinada perspectiva, alguns temes que no són de la seva especialitat esdevenen incitadorament propers d'altres que ell coneix o explora.

Emprendre un llibre sobre el temps i la memòria, dos temes absolutament centrals en la història del pensament, pot semblar una arrogància presumptuosa o una manca d'autocrítica. Vull aclarir des del principi, doncs, les limitacions en el propòsit d'aquest llibre, degudes a la forçosa modèstia de les meves possibilitats. He pretès, simplement, oferir una panoràmica d'alguns dels aspectes que la ciència d'avui presenta sobre aquests temes, en els quals s'ha

enfocat la meua curiositat. La meua especialitat científica és la termodinàmica dels processos irreversibles, un dels camps de la física en què les qüestions sobre el temps es plantegen més agudament, tant en els fonaments teòrics com en les aplicacions físiques, químiques, cosmològiques i biològiques. Això excusa, en part, la desmesura aparent d'aquesta gosadia i explica la il·lusió que li he dedicat, sense que l'amplitud d'aquests interessos em semblés una dispersió gratuïta i frívola.

En el segle v aC, Heràclit i Parmènides exposaren les seves visions del món. Per al primer, la manera de ser del món era un continu fluir, mentre que per al segon la veritat del món consistia en l'ésser etern i immutable. La radicalitat d'aquesta oposició entre temps i memòria, canvi i permanència, ha marcat la cultura occidental, la concepció de la matèria i del temps, la concepció de l'home, i es troba també en la ciència i la vida contemporànies i en les lleis de la termodinàmica. Cadascun d'aquests temes té les seves autoritats, els seus especialistes, els seus pensadors originals, als quals el lector interessat farà bé d'acudir. Igualment, l'al·lusió a filòsofs i escriptors no és —ni podia ser— completa ni detallada, però no en podia mancar la referència en una obra com aquesta, que pretén estimular diàlegs i curiositats. Pot ser, fins i tot, que les mancances d'aquest llibre resultin, per a alguns lectors, tan o més estimulants que no pas els seus detalls científics com a invitació a aprofundir en els temes tractats.

En la primera part del llibre parlarem de la memòria i la permanència. Això ens durà, en un primer capítol, a les exploracions de la física sobre allò permanent en el món, manifestat en lleis de conservació, constants universals i simetries. En el capítol segon, tractarem la permanència en biologia: la memòria genètica, neuronal i immunitària. La segona part és dedicada al temps. El capítol tercer revisa els diversos significats del temps en les diverses branques de la física: mecànica, relativitat, cosmologia, termodinàmica, i el capítol quart examina la multiplicitat del temps en biologia: regulador en els ritmes biològics, creador en l'evolució i destructor en l'envelliment. Un possible avantatge d'aquesta amplitud és que invita alhora a la síntesi i a la combinatòria, dos estímuls tradicionals de la creativitat. He pretès, però, fer un llibre breu, llegible en un parell d'hores i que afavorís una visió de conjunt, i he procurat evitar les minúcies apassionants de l'especialització i la dispersió de les anècdotes irrellevants.

Tot i que en aquesta exposició ens referirem sobretot a la ciència, cal no oblidar que al llarg del segle XX la tècnica ha modificat profundament —més encara que la ciència— la nostra percepció del temps i de la memòria. Per exemple, els telescopis han expandit el cel, ens han descobert un univers dinàmic i ens han permès esbrinar-ne l'edat; la mesura del temps ha millorat en sensibilitat i precisió; gràcies als progressos mèdics, l'esperança de vida s'ha allargat substancialment, i la reflexió sobre la pròpia mort és molt poc present en la nostra societat, tot i que la dels altres s'ha fet més visible en pel·lícules i en notícies. Pel que fa als referents culturals i vitals, la velocitat ha estat una de les constants culturals del segle —quin estímul per al futurisme i les avantguardes!—; hi ha hagut una acceleració dels invents i del ritme de vida, que fan que poguem conèixer moltes més coses diferents que els nostres antecessors, però que, d'altra banda, produeixen una sensació de desarrelament, frustració i angouxa; el futur és incert i en bona part imprevisible; els electrodomèstics i la informàtica han alliberat temps dedicat a tasques rutinàries i feixugues i han contribuït a generalitzar l'accés de les dones a la feina remunerada i fora de la llar; la primacia del crèdit sobre l'estalvi ha anticipat la possessió d'allò cobejat, sense el llarg esforç per aconseguir-ho —i potser ha fet que valorem menys les coses que posseïm—; el cinema i la simulació per ordinador han permès d'alentir o d'accelerar el ritme del temps; el suspens cinematogràfic juga amb els ritmes del temps com a factor fonamental. Més encara: en física, el temps s'ha relativitzat i passa a dependre del moviment de l'observador; en les arts, l'eclecticisme postmodern cerca inspiració en totes les èpoques passades i la combina segons el gust de l'artista en un *collage* sense perspectiva temporal; la vida de ciutat ens ha separat dels ritmes naturals, i els frigorífics i els transports ens permeten menjar de tot en qualsevol època. Els mitjans de comunicació ens presenten molts esdeveniments llunyans, gairebé simultàniament al seu esdevenir real, en una mena d'anul·lació de retards i de fronteres que esberla amb problemes llunyans el relatiu benestar del nostre entorn.

També han estat decisius els canvis pel que fa a la memòria. A finals del segle XIX s'inventaven el cinema i el fonògraf, que permetien enregistrar en una memòria material el flux de les imatges i de la veu: cinema i discs han constituït, amb la televisió i el llibre, les bases amb més presència pública de la cultura del segle XX. L'esclat de l'electrònica i la informàtica ha permès crear vastíssimes memò-

ries fàcilment accessibles, comprimides en espais minúsculs (un CD-ROM pot contenir molts llibres) i aplicar aquests recursos a la creació de noves realitats virtuals, de manera que els arxius de la memòria van canviant del paper a aquestes noves formes, encara una mica insegures per les contínues novetats que hi ha en els sistemes d'enregistrament i lectura. També la literatura ha assajat noves maneres de representar el temps: des de *À la recherche du temps perdu* de Proust a la immensa obra memorialística, personal i col·lectiva, de Josep Pla. Però les grans guerres del segle XX, les catàstrofes del feixisme i del comunisme, han convertit la memòria històrica en un espai que cal tenir urgentment en compte per intentar evitar la repetició dels terribles esdeveniments dels camps nazis d'extermini o del *gulag* soviètic. Des del punt de vista energètic, el frenètic consum de petroli i de carbó que ha marcat les comoditats i la potència del segle XX ha representat viure de la memòria històrica acumulada: milions d'organismes antics convertits en combustibles fòssils que han estat consumits en un parell de segles i l'exhauriment dels quals ens obligarà a buscar amb urgència alternatives energètiques, netes i renovables, si és possible.

En definitiva, la visió actual del temps i de la memòria ha estat profundíssimament influïda per la cultura tecnocientífica. Temps i memòria vinculats també amb la informació: aquest immens gavall de dades que, per a no consumir-se en la inanitat o l'angoixa, demana síntesis, claus, estructuracions, tot i que siguin forçosament provisionals, que converteixin la informació en coneixement i invitin a destil·lar-ne, si és possible, alguna saviesa. En efecte, en algunes èpoques ha calgut que l'intel·lectual actués com a motor del progrés. Actualment, tant per motius polítics, com la caiguda del sistema comunista, com per motius de moda intel·lectual, com la postmodernitat, el concepte de progrés està en crisi. Potser avui l'intel·lectual es veu submergit en una allau i ha de tractar, més que no pas d'accelerar el progrés, de canalitzar-lo, d'enfocar-ne les immenses energies de coneixement i d'acció cap a les fites més importants, tot fugint de les asfíxies de les minuciositats irrellevants i de les urgències a curt termini. Per això, tot i que aquí examinarem amb un cert detall les fronteres científiques en el temps i la memòria, ho farem no pas amb propòsit d'exhaustivitat, sinó de síntesi i estructura.

Aquest llibre sorgí d'un cicle de quatre conferències a la Fundació Joan Maragall el mes d'octubre de 2000. El model en fou un ci-

cle semblant sobre matèria i materialisme que hi vaig fer el 1994, el text del qual fou publicat en primera edició per l'Institut d'Estudis Catalans en la col·lecció *Arxius de les Seccions de Ciències* (1997) i en una segona edició, més fàcil de trobar a les llibreries, per Edicions La Magrana, en la col·lecció «L'Esparver-Ciència» (1999). Agraïxo a la Fundació Joan Maragall, dedicada a impulsar el diàleg entre el cristianisme i la cultura contemporània, l'estímul inicial en aquests projectes d'examinar amb un cert detall l'estat actual i l'evolució històrica d'alguns dels conceptes clau en les discussions entre ciència, humanisme i teologia. També agraïxo a la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans (de la qual tinc l'honor de ser membre) la bona disposició a publicar la primera edició d'aquestes noves exploracions.

David Jou*

* Secció de Ciències i Tecnologia.

I. LA MEMÒRIA

En els moments en què ens concentrem prou com per preguntar-nos què som realment i què volem de veritat, se'ns fa imprescindible buscar l'essencial del món i de nosaltres mateixos, allò de la nostra vida i del nostre entorn que ens defineix i que voldríem salvar i comprendre. No és estrany que Parmènides fes d'allò immutable el centre de la seva filosofia, com tampoc no ho és que sant Agustí relacionés l'ànima amb la memòria ni que els pobles busquin en la història allò que els és més característic i que els impulsa vers el futur. El nostre jo no és tan sols el cos i l'activitat d'ara, sinó també els nostres records essencials i aquelles circumstàncies potser no recordades, però que han afaïçonat decisivament el nostre estat actual. Alguna cosa semblant ens passa quan volem comprendre el món: constatem el seu flux, la seva diversitat, però advertim rere d'ells uns patrons de repetició o de permanència. Estimem la singularitat fugissera, però també la vertebració i la coherència. Volem exprémer l'instant però anhelem, de vegades, la seva cristallització, la seva permanència: l'eternitat. Per això, l'afany de la ciència per buscar allò de més durable i general rere els canvis i la diversitat del món no ens és vitalment aliè, sinó més aviat natural, potser profundament constitutiu. L'objectiu de la primera part d'aquest llibre és examinar aquesta recerca del permanent i de la memòria en la ciència i, en especial, les seves representacions i problemes en la ciència contemporània.

La facultat de la memòria ha estat analitzada per la filosofia i la psicologia: hem al·ludit ja a sant Agustí, que hi veia l'ànima, però no ha estat pas l'únic: Leibniz i Bergson també veien en la memòria una clau per al coneixement d'un mateix; en canvi, d'altres pen-

sadors, com Nietzsche, han trobat el pes del record tan feixuc que han arribat a la conclusió que, sense l'oblit, l'home no podria viure: efectivament, hi ha records que pesen com remordiments, com rancúnies, hi ha tradicions voraçment xucladores de vida i escapçadores de novetats. No tot és bell en la memòria, i de vegades cal alliberar-se'n, fugir del seu determinisme o del seu pes. Els defectes o excessos de la memòria han estat sovint un tema literari: l'oblit dels menjadors de lotus de l'*Odissea* d'Homer, el record precís i total de «Funes el memorioso» de Borges són dos exemples extrems.

Molts pensadors han dubtat de la capacitat de la ciència de copsar la realitat més profunda i que, per tant, convé relativitzar el que la recerca científica d'allò permanent ens pugui dir sobre l'ésser del món o de l'ànima. En recordaré alguns testimonis. Per a Kant, la ciència ens revela els fenòmens, però no el noumen o «cosa en si» del món, per a assolir el qual caldria, potser, la poesia. Per a Bergson, la conceptualització en general i, en particular, la científica, deixa escapolir de la realitat allò que constitueix la seva mateixa essència, i la formació de conceptes neix de la imperfecció del cognoscent limitat que no pot aprehendre directament tota la realitat com a intuïció directa que, per a ell, «és aquesta espècie de simpatia intel·lectual per la qual ens traslладem a l'interior d'un objecte per coincidir amb el que té d'únic i, per consegüent, d'inexpressable». Heidegger es queixa de l'oblit de l'ésser en la ciència actual i veu amb enorme desconfiança la tecnologia i critica la inautenticitat del temps que no pren en consideració l'horitzó de la mort. Karl Jaspers afirma que «la tristor de l'existència humana comença quan el que es coneix d'una manera científica es confon amb l'ésser mateix i quan tot el que no es pot conèixer seguint un mètode científic es considera com a no existent. La ciència es converteix en una superstició de la ciència, i aquesta superstició envolta, amb la seva aparença de ciència, tot un cúmul de bogeries en què no hi ha ni ciència, ni filosofia, ni creença»...

En aquest text no hem pretès, però, atribuir a la ciència la paraula definitiva sobre les coses, sinó prendre el panorama contemporani com a pretext de reflexió sobre aquests temes. La ciència prioritza allò de comprovable, de repetible, de general, i defuig les singularitats dels objectes o els individus concrets. També ho fa, de vegades, l'ontologia, quan empaita un Ésser amb una majúscula excessivament esclafadora. Algunes de les permanències que veurem

aquí —les magnituds conservades, les constants físiques, el codi genètic— representen aquesta volada relativament abstracta, que convé que es realitzi en processos concrets i en individus singulars. És en aquesta concreció —aplicacions del genoma, fonts d'energia...— on es plantegen algunes de les qüestions ètiques i de les possibilitats tècniques que caracteritzen el món actual, i a les quals també dedicarem atenció.

1. LA FÍSICA I LA PERMANÈNCIA

Els filòsofs grecs buscaren en els nombres i en els àtoms les bases permanents del món: una permanència enllà de l'immediatament sensible, situada en la ment més abstracta o en la matèria més subtil. Així, el món canviant de la realitat seria tan sols una aparença oferta als sentits, una representació indirecta de la realitat més profunda. Una de les primeres representacions de la permanència de l'ésser fou l'ordre matemàtic que Pitàgores —i, després d'ell, Plató i tants d'altres— atribuï a l'Univers. Posteriorment, les relacions primitives de Pitàgores anirien esdevenint lleis cada cop més refinades i generals a mesura que evolucionaven les matemàtiques i la física.

L'intent de conciliar els punts de vista aparentment oposats de Parmènides, per a qui el món autèntic és la permanència, i d'Heràclit, per a qui la realitat del món és el flux de l'esdevenir, dugué Demòcrit a postular el concepte d'àtom. L'àtom, indivisible, immutable, representaria la permanència de l'ésser parmenidià, mentre que les seves combinacions per donar lloc a objectes diversos serien, en la seva fragilitat i contingència, l'expressió del fluir heraclitià. Aconseguia d'aquesta manera combinar els dos punts de vista, aparentment antagònics, sense postular entitats metafísiques. Epicur bastí a partir d'aquesta visió atomística del món tota una filosofia materialista i una manera de viure, que invitava al gaudi mesurat i prudent de la vida i a la pau espiritual de pensar que després de la mort no hi ha sofriments, sinó una desaparició total.

Plató, influït per Pitàgores i per Parmènides, i coneixedor també de l'atomisme, tractà de compatibilitzar la permanència i el canvi mitjançant la teoria de les idees, que, segons ell, representa-

ven la realitat autèntica, immutable, eterna, bona i bella: els nombres en formaven part i afaïçonaven els àtoms. Els conceptes matemàtics serien un exemple natural d'idea permanent, independent dels humans. La naturalesa —en frase represa posteriorment per Galileu— era vista com un llibre escrit en llenguatge matemàtic. A aquesta opinió s'hi han oposat altres concepcions de les idees matemàtiques, en què aquestes són vistes no pas com una veritat independent dels humans, sinó com una conseqüència de l'activitat lògica de la ment humana. De fet, l'extraordinària eficàcia de les matemàtiques en la descripció del món ha sorprès i segueix sorprendent nombrosos investigadors: construïm teories matemàtiques del món i observem un acord molt elevat entre les seves prediccions i les observacions i experiments. Alguns autors addueixen que les matemàtiques han estat formulades a partir de l'experiència de la realitat, i per això no ens hauria de sorprendre el seu acord amb aquesta. Malgrat això, les matemàtiques porten a formular noves estructures que van molt més enllà de qualsevol experiència anterior, i que, potser al cap de molts anys, serveixen òptimament per descriure nous aspectes de la realitat que mai no havíem pogut ni imaginar. En són exemples, entre d'altres, la teoria de la relativitat general, amb el seu ús de l'anàlisi tensorial, i les prediccions sobre la curvatura de la llum en camps gravitatoris o sobre l'existència d'ones gravitatòries, i la predicció d'antimatèria a partir de l'equació de Dirac en la mecànica quàntica.

Matemàtiques, àtoms...: Plató combinà aquests dos aspectes, és a dir, la teoria atòmica i la teoria pitagoricomatemàtica, tot atribuint als àtoms formes de políedres regulars i restringint les possibles combinacions atòmiques mitjançant lleis geomètriques molt precises, relacionades amb la conservació del nombre de certs triangles. Així, les cares d'aquests políedres (triangles i quadrats) poden ser descompostes en triangles rectangles de dues menes: uns d'isòsceles, de costats a , $a/\sqrt{2}$, $a/\sqrt{2}$ (la meitat d'un quadrat de costat a en ser tallat per la diagonal) i uns d'escalens, de costats a , $a/2$, $a(\sqrt{3})/2$ (la meitat d'un triangle equilàter de costat a , en ser tallat per una altura). Plató postulà que aquests dos tipus de triangles elementals no poden ser creats ni destruïts, de manera que en cada transformació possible el seu nombre ha de ser conservat. D'aquí se'n segueix que aigua, aire i foc podrien reaccionar entre ells però no la terra, ja que les cares dels seus políedres respectius estan formades per triangles de classes diferents. El valor del costat a queda

indeterminat, però se suposa implícitament que és constant i molt petit. En aquesta visió tan original, els nombres i els àtoms, les dues representacions primeres de la permanència, conflüen.

En aquest capítol ens referirem a tres aspectes molt generals de com la física actual preveu la permanència en la natura: lleis de conservació, constants físiques i simetries. Encara que totes tres idees semblin respondre a una realitat de caire profundament matemàtic, expressen, com en el platonisme, una profunda vinculació entre l'ordre matemàtic i la matèria. De fet, hem trobat aquestes tres idees en el model platònic: lleis de conservació pel que fa al nombre total de triangles elementals; constants de la naturalesa, pel que fa a la mesura α del costats dels triangles elementals; i principis de simetria, ja que els àtoms hi són suposats poliedres regulars. En la física del segle XX, la relació profunda entre nombres i estructura de la realitat es fa especialment crucial: energia i matèria són relacionades per Einstein el 1905; des de finals de la dècada dels setanta, la cosmologia posa en evidència la importància crucial dels valors de les constants físiques en el contingut material de l'Univers, que no podria tenir molècules complexes ni vida si els valors de les constants fossin gaire diferents dels que tenen en realitat; des de la formulació de la teoria dels quarks a mitjan dècada dels seixanta, la física troba en simetries relativament abstractes una manera coherent i fructífera de classificar les partícules elementals. Com en les intuïcions platòniques, doncs, ordre matemàtic i ordre material queden profundament vinculats.

1.1. LES LLEIS DE CONSERVACIÓ

La simple visió de les estrelles és un viatge en el temps: veiem estrelles que fa milers d'anys que van deixar d'existir, però la mirada no ho sap i ens presenta esdeveniments d'èpoques molt diferents com a present simultani. Cal, doncs, una anàlisi teòrica subtil per descobrir aquesta profunditat temporal. D'entre les lleis físiques, les que millor posen de manifest la permanència són les lleis de conservació, que tenen un paper fonamental en l'edifici teòric. En certa manera, aquestes lleis ens descobreixen la memòria de l'Univers —què recorda l'Univers dels seus orígens; què hi ha de constant en l'Univers si fins i tot les estrelles desapareixen...

Les lleis de conservació es refereixen a la permanència de mag-

nituds concretes com ara la quantitat de moviment, el moment angular, l'energia, la càrrega elèctrica, certs nombres quàntics... Algunes d'aquestes lleis són exactes però d'altres són tan sols aproximades, com per exemple la llei de conservació de la massa, que se satisfà en els processos químics però no en les energies elevades de les reaccions nuclears, o la del nombre quàntic d'estranyesa, que es conserva en les interaccions nuclears fortes però no en les nuclears febles.

Les lleis de conservació constitueixen grans principis generals que han de ser satisfets per totes les altres lleis de la física, com ara les que descriuen aspectes concrets de les interaccions o del comportament de la matèria. En una analogia jurídica, podríem dir que les lleis de conservació són com una carta constitucional, que ha de ser respectada per les altres lleis. Les lleis de conservació estableixen, en essència, que hi ha uns certs nombres que es conserven mentre la natura va canviant, sigui quin sigui el procés que aquesta experimenta. En descriurem breument la història, els conceptes fonamentals i les conseqüències més atractives.

1.1.1. *La quantitat de moviment*

En el segle XVII, Galileu proposà el principi d'inèrcia, radicalment oposat a la física aristotèlica, per tal de resoldre algunes paradoxes que semblaven invalidar el model copernicà del sistema solar. Aquesta exposició és presentada detalladament a *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, ptolemaico e copernicano* (1632) i a *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica di movimenti locali* (1638). Per tal d'explicar el moviment aparent del Sol en el cel al llarg del dia, cal suposar que la Terra gira sobre ella mateixa amb gran velocitat (uns 40.000 km per dia, és a dir, uns 1.700 km per hora, a l'Equador, i uns 1.200 km per hora a les nostres latituds). Un argument en contra de la rotació de la Terra consistia que si saltéssim, el terra correiria sota nostre i aniríem a caure en un lloc diferent d'on vam emprendre el salt (uns tres-cents metres si el salt hagués durat un segon). Com que això no s'observa, se'n segueix que la Terra no gira. En el context de la física aristotèlica, en efecte, aquest era el punt de vista més adient ja que, segons Aristòtil, un objecte només es mou quan actua sobre ell alguna força.

Per a Galileu, aquesta paradoxa queda resolta si els objectes tendeixen a conservar el seu moviment o, més en concret, la seva quantitat de moviment —expressada pel producte de la massa per la velocitat—, si no actua cap força sobre ells. Així, en saltar, la persona conserva el moviment solidari amb la Terra que tenia abans del salt, i va girant junt amb la Terra. Per això, torna a caure en el mateix punt on havia iniciat el salt, de manera que el fet que no s'observi el desplaçament relatiu entre l'individu i la Terra no implica que aquesta no giri. Veiem, doncs, que el principi d'inèrcia sorgeix no pas d'una consideració purament acadèmica, sinó en el context de la discussió apassionada d'un model cosmològic centrat en un ampli context cultural.

Una certa idea de la conservació del moviment havia estat formulada el segle XIV per Jean Buridan a París, el qual va postular la teoria de l'*impetus*, un principi de moviment posat per Déu en el món i que es conserva sense minva ni creixement. En els *Principia philosophiae* (1644), Descartes transformà la formulació de Galileu, referida als moviments de rotació de la Terra i del sistema solar, en un autèntic principi general d'inèrcia o conservació del moviment, que trobem en la seva filosofia en l'afirmació que el moviment total en l'Univers es conserva. Descartes aprecià especialment la idea d'una formulació matemàtica de les lleis del moviment, i afirmà que era possible explicar tots els fenòmens a partir d'un espai homogeni, de cossos materials, i de la descripció dels seus moviments segons les lleis de les col·lisions que se segueixen de la conservació de la quantitat de moviment. Així, tot fenomen seria descriptible mecànicament i el món estaria sotmès a un determinisme mecanicista. El mecanicisme de Descartes, basat en les col·lisions com a forma d'intercanvi de moviment, no admetia la idea d'interacció a distància que proposà posteriorment Newton. El seu model de sistema solar era un gran vòrtex de partícules que giraven al voltant del Sol i que arrossegaven amb elles els planetes (model que no satisfà, però, la tercera llei de Kepler).

En els *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* (1687), Newton adoptà com a primer principi de la mecànica la llei d'inèrcia, i el complementà amb dos principis més. El segon, o llei fonamental de la dinàmica, estableix com varia la quantitat de moviment en presència d'una força. Aquest principi afirma que la variació per unitat de temps de la quantitat de moviment és igual a la força aplicada sobre l'objecte, enunciat que, si els objectes tenen

massa constant, pren la forma ben coneguda de força igual al producte de la massa per l'acceleració. La formulació de les lleis de Newton suposà un gran pas endavant respecte de les de Galileu i Descartes, que no es plantejaven aquesta qüestió, i constitueix la base de la mecànica moderna.

Newton establí, encara, un tercer principi, o llei d'acció i reacció, que afirma que si un cos fa una força sobre un altre, el segon fa sobre el primer la mateixa força però de sentit oposat. Aquesta idea de reciprocitat no és gens òbvia: hi ha moltes situacions de la naturalesa en què interaccions no mecàniques no la satisfan. Per exemple, que una neurona influeixi una altra a través d'una sinapsi no implica de cap manera que la segona neurona influeixi la primera a través d'una altra sinapsi. Tot i això, en mecànica aquest principi és necessari ja que, si no, en posar dos cossos immòbils en contacte mutu, un podria fer més força sobre l'altre que a l'inrevés, i tots dos s'accelerarien espontàniament, sense cap força exterior, en la direcció de la força més intensa.

Si considerem un sistema de moltes partícules, el principi d'acció i reacció permet de demostrar que les forces entre elles no canvien la quantitat de moviment total, de manera que, si no actua cap força externa al sistema, la quantitat de moviment total es conserva, tot i que algunes partícules puguin guanyar quantitat de moviment mentre que d'altres en perden. Aquesta llei és molt útil, per exemple, en l'estudi de les col·lisions, o en la balística, o ciència del moviment dels projectils: si per tal d'estudiar la variació de les velocitats en la col·lisió calgués considerar amb detall totes les forces internes que actuen entre els cossos, el problema seria extremadament complex. En canvi, en aplicar la conservació del moment lineal, és a dir, en imposar que la quantitat de moviment total final és igual a la inicial, el problema resulta molt més simple.

El principi d'inèrcia tingué tres repercussions conceptuais molt importants. En primer lloc, suposà un trencament amb la física aristotèlica, cosa que, després d'un llarg període d'autoritat gairebé absoluta del pensament d'aquest filòsof, n'inicià una crítica profunda. En segon lloc, féu versemblant la rotació de la Terra, en explicar perquè no en veiem directament cap efecte en els moviments quotidians, cosa que legitimà el model copernicà del sistema solar i, per tant, contribuí a un canvi de visió del cosmos. En tercer lloc, canvià la manera de veure les relacions entre Déu i el món. En el context aristotèlic —emprat per sant Tomàs d'Aquino en la *Sum-*

ma Teologica— el moviment de les coses era una manifestació de l'acció incessant d'un motor. Per això, la primera de les cinc vies de demostració de l'existència de Déu que formulà sant Tomàs era precisament la del moviment de les coses. En canvi, en el context de la inèrcia, Déu podia formar el món, amb el seu contingut de moviment i de forces i, després, desentendre-se'n completament, com un rellotger es pot desentendre del seu artefacte mecànic un cop n'ha acabat la construcció i li ha donat corda. Per això, en certa manera, el principi d'inèrcia suposà un allunyament de Déu del món i inaugurà una època mecanicista de funcionament immanent del món, sense necessitat d'intervencions externes.

1.1.2. *Quantitat de moviment angular*

Les condicions d'equilibri de translació (és a dir, que la suma de les forces aplicades sobre un sistema sigui igual a zero) no garanteixen pas l'equilibri de rotació. Per exemple, si sobre els extrems d'un diàmetre d'un volant apliquem dues forces iguals però de sentit oposat, el volant comença a girar. Per a l'estudi de les rotacions cal tenir en compte la quantitat de moviment angular, o moviment referit al centre de rotació, definit com el producte (vectorial) del vector que va des del centre de rotació fins a l'objecte puntual considerat, per la quantitat de moviment lineal d'aquest objecte. En un sistema compost per més d'una partícula, la quantitat de moviment angular total és la suma de les quantitats de moviment angular de cada partícula.

Si no actuen forces externes sobre el sistema, o bé si les forces són centrals (és a dir, dirigides segons la línia que uneix cada dos cossos que formen el sistema, com passa per exemple en les forces gravitatòries o electrostàtiques), la quantitat de moviment angular és conservada. En la rotació d'una partícula que descriu un cercle d'un radi determinat, la quantitat de moviment lineal és el producte de la massa de la partícula per la seva velocitat i la quantitat de moviment angular és el producte de la massa per la velocitat i pel radi.

Per tal que la quantitat de moviment angular es conservi, la suma dels moments de les forces respecte del centre de rotació ha de ser nul·la. Aquests moments són el producte de la força pel braç de palanca respectiu. Un cas concret de les condicions d'equi-

llibri de rotació és la llei de la palanca, formulada per Arquimedes en el segle III aC, és a dir, la idea que la suma dels productes de les forces que actuen sobre un cos multiplicades pels seus braços de palanca respectivament ha de ser nul·la en equilibri. A diferència de la llei de la palanca, el balanç de moments angulars no es limita al cas estàtic, sinó que relaciona el moment total de les forces amb l'acceleració angular del sistema i el seu moment d'inèrcia, de manera anàloga a com la segona llei de Newton relaciona la força total amb l'acceleració lineal i la massa del sistema.

Algunes altres conseqüències remarcables de la conservació del moment angular són:

a) La segona llei de Kepler, segons la qual l'àrea escombrada per unitat de temps pels planetes en les seves òrbites al voltant del Sol és constant (és a dir, han de córrer més quan més a prop estan del Sol); així, la Terra corre més durant l'hivern que durant l'estiu; aquesta llei se satisfà també per als diversos satèl·lits que giren al voltant de cada planeta.

b) L'acceleració angular que experimenten les estrelles en contraure's; en efecte, com més petit és el radi, més gran ha de ser la velocitat amb què gira la partícula per tal que es conservi el producte de massa per radi per velocitat. Això fa que les estrelles de neutrons, procedents de la contracció espectacular de nans blancs, tinguin velocitats angulars elevadíssimes, de l'ordre de centenars de rotacions per segon, cosa que els pot donar un comportament pulsant d'alta freqüència (per això, algunes d'elles, que emeten radiació electromagnètica, són anomenades *pulsars*).

c) L'allunyament progressiu de la Lluna respecte de la Terra, a mesura que es va reduint la velocitat de rotació d'aquesta a causa de la fricció de les marees. Per tal de conservar la quantitat de moviment total del sistema Terra-Lluna, aquesta es va allunyant de la Terra, i en incrementar el seu radi de gir compensa la minva de moviment angular de la Terra i fa que el moviment angular total del sistema Terra-Lluna romangui constant. La velocitat d'allunyament, actualment, és d'uns cinc centímetres per any, valor compatible amb les observacions de l'alentiment angular de la Terra.

Les conseqüències pràctiques i conceptuals d'aquest principi es remunten a la formulació primitiva de la llei de la palanca. Recordem que la majoria de les màquines mecàniques clàssiques es basen en aquesta llei: com més gran és el braç de palanca, més petita és la força que cal fer per dur a terme una operació, com ara aixecar un

pes. Això incrementà notablement la capacitat d'acció dels humans. En una frase que li és atribuïda («doneu-me un punt de sustentació i aixecaré el món»), Arquimedes expressà l'optimisme d'aquest increment de possibilitats, d'aquesta capacitat de multiplicar l'acció de les forces, de la victòria de l'enginy sobre la brutalitat, que ell concretà, fins i tot, en algunes màquines de guerra que permeteren Siracusa de resistir durant un temps considerable l'escorment de les tropes romanes.

1.1.3. *L'energia*

La llei de conservació de l'energia és la més coneguda de la física: «l'energia ni es crea ni es destrueix, només es transforma». Tot i això, la seva història és llarga i enrevessada i el seu concepte no és fàcil de definir amb precisió. La conservació de l'energia mecànica (l'energia del moviment, o cinètica, més l'energia potencial deguda a forces com ara la gravitatòria o l'elàstica i que depenen, doncs, de la posició o la configuració del sistema) havia entrat a formar part de la física des de finals del segle XVIII, quan s'observà que el treball fet sobre un objecte n'incrementava la *vis viva* (el producte de la massa pel quadrat de la velocitat, en la denominació de Leibniz, i anomenada posteriorment *energia cinètica*, previ producte per un factor 1/2). El 1807, T. Young fou el primer a utilitzar la paraula *energia* en el sentit modern, però aplicada tan sols en la mecànica.

Durant uns anys, Descartes i Leibniz discutiren si la *vis viva* és un concepte redundant (Descartes) o necessari (Leibniz) per a la descripció del moviment. Un exemple intuïtiu posa de manifest el caràcter no redundant de l'energia cinètica: suposem un cotxe de 1.000 kg que es desplaça a 0,01 m/s i una bala de 10 g que avança a 1.000 m/s. Sabem intuïtivament que si el cotxe ens envesteix a aquesta velocitat (per exemple, quan l'empenyem en un garatge), no ens passa res i que, en canvi, la bala ens pot matar o malferir. Tot i això, tots dos objectes tenen la mateixa quantitat de moviment, ja que $1.000 \text{ kg} \times 0,01 \text{ m/s} = 0,010 \text{ kg} \times 1.000 \text{ m/s} = 10 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. En canvi, el càlcul de l'energia cinètica dóna, per al cotxe, $(1/2)(1.000 \text{ kg})(0,01 \text{ m/s})^2 = 0,050 \text{ joules}$, i per a la bala $(1/2)(0,010 \text{ kg})(1.000 \text{ m/s})^2 = 5.000 \text{ joules}$. Així, la capacitat destructora de la bala queda posada de manifest en l'alt valor de la seva energia, mentre que no queda reflectida en la seva quantitat de moviment.

L'afany d'aconseguir una acció sense cap esforç és un deler antiquíssim. Un dels primers a argumentar-ne la impossibilitat física a partir de lleis mecàniques fou l'holandès Simon Stevin, el 1587, a partir d'arguments basats en una cadena de boles que pugen i baixen per un pla inclinat. Tot i la difusió de la idea de conservació d'energia mecànica, l'afany de produir treball sense cap cost seguí donant lloc a moltíssimes propostes irrealitzables, tantes que el 1775 l'Acadèmia de Ciències de París refusà considerar més articles sobre el *perpetuum mobile* (del primer gènere), nom que rebien les màquines hipotètiques que feien contínuament treball a canvi de res, així com refusà simultàniament de considerar més demostracions sobre la quadratura del cercle.

La inclusió d'efectes tèrmics complicà considerablement la qüestió. Per considerar la calor com a forma d'energia calgué superar les teories que la consideraven com a matèria. En primer lloc, la teoria del flogist de Stahl, segons la qual la calor era una substància continguda en els cossos i que aquests alliberaven durant la combustió, i que tingué molts seguidors durant el segle XVIII. Posteriorment, en observar mitjançant mesures molt acurades que la massa de molts cossos augmenta durant la combustió, Lavoisier proposà una nova teoria —que ocasionà tota una revolució en la química—, en la qual la calor és un fluid material lleuger i imponderable, anomenat *calòric*; la calor despresada durant la combustió no rau tant en l'alliberament d'aquesta substància com en l'enriquiment relatiu de l'aire en calòric en disminuir el seu contingut en oxigen —l'existència del qual també fou proposada per Lavoisier a *Traité élémentaire de chimie* (1789)— durant l'oxidació, que consistiria en una combinació dels cossos amb l'oxigen en lloc d'un alliberament de flogist. La teoria del calòric fou força fructífera en l'anàlisi d'alguns fenòmens tèrmics, com la teoria de Fourier de la conducció de la calor, la de Laplace i Poisson sobre la velocitat del so i la teoria de Carnot del rendiment màxim de les màquines tèrmiques, totes elles de principis del segle XIX.

La reticència envers la visió materialista del calòric i l'interès a assajar-ne altres visions tingué com a precursors Descartes a París, Sir H. Davy a Londres i el comte Rumford a Munic. Un dels arguments en contra del caràcter material de la calor fou el fet que la fricció en pot produir quantitats indefinides. Això, al principi, no preocupava gaire els partidaris del calòric, que sostenien que els objectes emmagatzemen una certa quantitat de calòric latent, i el

que fa la fricció és alliberar-lo. Ara bé, Rumford, director dels arsenals de Munic, en observar la immensa quantitat de calor que es desprenia en barrinar els canons, mesurà la calor específica del ferro abans i després d'aquest procés, sense observar-hi ni el més mínim canvi, de manera que desestimà la idea que els objectes variesin el seu contingut en calòric durant la fricció. Com que en la fricció es perd quantitat de moviment, formulà la hipòtesi que la calor és moviment intern de les partícules que constitueixen els objectes.

Una reflexió més detallada i quantitativa fou estimulada per l'estudi de les màquines tèrmiques (en investigadors com Carnot i Joule) i dels processos fisiològics (en autors com Mayer i Helmholtz). En el cas de Mayer, aquesta reflexió començà amb les observacions com a metge naval, en viatges d'Holanda a Java. Observà que la sang venosa dels mariners era més vermellosa quan eren als tròpics que no pas quan eren a Holanda, on resultava més blavosa. En deduí que al tròpic la sang venosa conserva més oxigen que no pas a latituds més fredes. Com que el treball que feien els mariners era essencialment el mateix en tots dos llocs, va atribuir la diferència en el contingut d'oxigen a la temperatura més elevada dels tròpics. Així, va intuir que l'oxigen s'esmerçava tant a fer treball com a desprendre calor —desprendiment més petit als tròpics que no pas a Holanda— i arribà a la idea que treball i calor són aspectes diferents d'una mateixa realitat. Anàlisis posteriors sobre la calor específica dels gasos a volum i pressió constants el dugueren a una bona avaluació teòrica de la quantitat d'energia corresponent a la unitat de calor.

Joule, en canvi, seguí una via força diferent: era un experimental molt precís i subtil, i obtingué l'equivalent mecànic de la calor (és a dir, la relació entre la unitat de treball i la de calor) comparant l'escalfament produït en un líquid per l'agitació d'una roda de paletes (el treball fet per la qual deduïa del descens d'un pes de massa coneguda en una politja connectada a la roda) amb l'escalfament produït per una quantitat donada de calor. Cap al 1850, quedà clar que la calor, com el treball, és una forma de bescanvi d'energia. Els tempteigs en la formulació de la primera llei duraren entre 1830 i 1850, i es degueren al treball independent de diversos autors, com els ja esmentats i alguns altres.

La llei de conservació de l'energia dugué a finals de segle XIX a una polèmica entre energetistes i atomistes. Aquests havien cercat

la permanència del món en els àtoms, els quals, però, no havien pogut ser observats directament. Aquells es preguntaren si, tenint ja una magnitud conservada, l'energia, accessible al mesurament empíric i que proporcionava una base de permanència, calia seguir postulant els àtoms. Les disputes en aquest camp —per exemple, entre Boltzmann, defensor dels àtoms, i Mach i Ostwald, defensors de l'energetisme basat en una filosofia radicalment positivista— foren aferissades i retardaren el naixement de la teoria atòmica física, tot i els progressos de Maxwell i Boltzmann en l'explicació cinètica de la conductivitat i la viscositat dels gasos.

El 1905 Einstein formulà, en el marc de la relativitat especial, la cèlebre relació $E = mc^2$, on E és l'energia, m la massa i c la velocitat de la llum en el buit, i que estableix que la massa és una forma d'energia. Des d'aleshores, ha estat comprovat repetidament que la massa no es conserva estrictament, i que per tenir conservació d'energia en reaccions nuclears i altres processos a energies elevades cal incloure l'energia de massa. Per exemple, l'energia que cal per trencar un nucli atòmic en els seus components —protons i neutrons— per separat és igual al defecte de massa del nucli, és a dir, a la suma de la massa dels constituents per separat menys la massa total del nucli. Aquesta llei descriu amb gran precisió les energies alliberades en les reaccions nuclears, tant de fissió —en què un nucli gran es trenca en dos de mitjans— com de fusió —en què dos nuclis lleugers es fusionen per produir-ne un de mitjà. Les reaccions del segon tipus són la font de l'energia alliberada pel Sol i les estrelles. El primer tipus de reacció és utilitzada en les armes nuclears i en les centrals nuclears.

Des de la formulació de la llei de la conservació de l'energia, hi ha hagut, també, alguns dubtes sobre l'abast de la seva validesa. El 1882, Helmholtz expressà algunes reserves sobre la seva aplicabilitat a processos biològics. El 1888, Gouy suggerí que el moviment brownià (agitació irregular de petites partícules com ara un gra de pol·len o de pols en suspensió en un fluid) no compleix la conservació de l'energia. La descoberta de la radioactivitat (de l'urani, per Becquerel el 1896, i del poloni i el radi pels Curie el 1898) posà de manifest el seu gran poder d'escalfament (1 g de radi escalfa en una hora 1,3 g d'aigua des de la fusió fins a l'ebullició) que semblava violar la conservació de l'energia, ja que, mentre l'escalfament era molt notable, els canvis en la matèria radioactiva eren gairebé inobservables. Les primeres hipòtesis foren la d'una excepció al primer

principi de la termodinàmica o la possibilitat que aquests àtoms extraguessin energia de l'atmosfera i l'acumulessin. Ja el 1904, Rutherford atribuï aquesta energia a algun canvi en l'interior dels nuclis.

El 1924 i el 1930 es manifestaren nous dubtes respecte a la conservació de l'energia en el món microfísic. Bohr, Kramers i Slater, el 1924, postularen que ni la causalitat ni la conservació de l'energia són satisfetes en cada esdeveniment microfísic individual sinó tan sols en una mitjana estadística. El 1925, estudis detallats de Compton posaren de manifest que en cada col·lisió fotó-electró (i no només estadísticament) la quantitat de moviment lineal i l'energia són conservades. Tot i això, en la desintegració beta (despreniment d'un electró per un nucli, quan un dels seus neutrons es converteix en un protó) l'electró emès no té sempre la mateixa energia. Això féu que, el 1930, Bohr tornés a insistir en el caràcter estadístic de la conservació de l'energia. Tanmateix, el desembre de 1930, Pauli proposà com a alternativa la possible existència d'una nova partícula, el *neutrino* (nom donat per Fermi el 1931), sense càrrega elèctrica i de massa molt petita o nul·la, que es repartiria amb l'electró l'energia total de la desintegració, de manera que la conservació de l'energia se satisfés exactament tant si l'electró s'enduu molta energia com si se n'enduu poca. El 1957 fou descobert el neutrino electrònic predit per Pauli. Des de llavors, la conservació de l'energia no ha tornat a ser qüestionada.

Tot i això, resten qüestions conceptuals pendents: què és l'energia? És un nombre? Una substància? Habitualment la definim com a capacitat de fer treball, però això té l'inconvenient de poder fer creure que, un cop s'ha fet el treball, ja no queda energia. D'altra banda, el primer principi de la termodinàmica afirma que l'energia es pot bescanviar tant en forma de treball com de calor, i el segon principi estableix que no és possible extreure energia (calor) d'una sola font tèrmica i convertir-la completament en treball. Per això, a mitjan segle passat, en proposar el segon principi, del qual parlarem en el capítol tercer, Lord Kelvin va parlar de mort tèrmica de l'Univers com un estat en què les estrelles s'haurien apagat i tot estaria a la mateixa temperatura, de manera que l'energia ja no seria aprofitable per fer treball.

L'energia no és una substància, ja que pot manifestar-se de maneres molt diferents: com a energia cinètica relacionada amb el moviment, o com a energia potencial emmagatzemada en la configura-

ció d'un sistema (energia potencial gravitatòria que descriu el treball que podria fer un objecte si caigués des d'una certa altura, o energia potencial electrostàtica, o capacitat de fer treball que tenen les càrregues elèctriques en funció de les seves posicions, o energia potencial elàstica, com la d'una molla comprimida que pot fer treball en expandir-se) o pot presentar-se, segons la teoria de la relativitat, en forma de massa d'una partícula... El més correcte és, probablement, referir-se simplement a un nombre associat amb cada estat d'un sistema, però aquesta abstracció ens fa difícil comprendre la realitat concretíssima de les seves manifestacions. Ens trobem, com Pitàgores, defensant que els nombres són l'essència de la realitat.

Una altra qüestió interessant relacionada amb aquest caràcter numèric és el zero de l'escala d'energies. Efectivament, en la física clàssica només interessen diferències d'energia, ja que són aquestes les que es manifesten en forma de treball mesurable. Per això, l'origen o zero d'energies és completament arbitrari. El zero de l'energia perd la seva ambigüïtat amb l'equació einsteiniana $E = mc^2$, que assigna un valor concret a l'energia d'un sistema constituït per una sola massa en repòs (sistema al qual la física clàssica podria atribuir, per conveni, qualsevol energia). També la relativitat general elimina l'arbitrarietat del zero d'energia, ja que, en aquesta teoria, el contingut d'energia determina la curvatura de l'espai-temps, de manera que l'energia zero correspondria a un espai-temps pla. Això ens porta a la cosmologia: avui, hom creu que l'energia total de l'Univers podria ser nul·la, cosa que d'antuvi sorprèn, ja que les immenses masses i energies de les estrelles són notablement positives. El fet és perquè, en física, les energies corresponents a forces atractives, com ara la gravitatòria, són negatives i, per tant, seria possible que en l'Univers els valors positius i negatius de l'energia es compensessin exactament. Això seria especialment elegant per a un Univers creat a partir de no-res, ja que seria la situació més simètrica, la més propera a la conservació de l'energia, si assignem al no-res inicial una energia nul·la.

Si fos així, algunes interpretacions físiques suggereixen que l'Univers podria ser el resultat d'una fluctuació quàntica. En efecte, el principi d'indeterminació de Heisenberg preveu que el buit quàntic és una contínua aparició i desaparició de parells de partícules i antipartícules, sempre i quan la durada t multiplicada per l'energia d'excés que suposa, E , sigui inferior a la constant de Planck h . Així, el temps màxim que poden durar els parells de partícula-antipartí-

cula de massa m és $t_{\max} = h/(2mc^2)$, on hem tingut en compte la relació d'Einstein entre la massa i l'energia. Ara bé, si l'energia total de l'Univers fos zero, aquest podria correspondre a una fluctuació quàntica de durada infinita o molt llarga. Així, l'infinit dels espais còsmics quedaria íntimament lligat amb el zero de l'energia.

1.1.4. Càrregues

La conservació de la càrrega elèctrica és la primera llei de conservació de càrregues, però posteriorment la física ha introduït noves càrregues per tal de descriure altres interaccions que les elèctriques, com ara la càrrega de color dels quarks. Evocarem la història del concepte de les càrregues elèctriques i de la seva conservació i ens referirem a algunes altres menes de càrregues.

1.1.4.1. Càrrega elèctrica

Les forces electrostàtiques han estat conegudes des de l'antiguitat. Els grecs observaren que en fregar vidres o resines —o altres substàncies— aquestes adquirien la propietat d'atreure o repel·lir petits objectes. El 1733, Dufay va proposar l'existència de dues menes de càrrega elèctrica, que anomenà *víttria* i *resinosa*, respectivament, i afirmà que càrregues iguals es repel·leixen i càrregues oposades s'atreuen. El 1747, Benjamin Franklin canvià aquesta denominació de les dues menes de càrrega per positiva i negativa, cosa que facilità la seva matematització, ja que el producte de signes diferents és sempre negatiu (força atractiva) i el producte de signes iguals és positiu (força repulsiva). El 1785, Coulomb formulà la primera llei quantitativa sobre la força entre càrregues elèctriques en repòs, a partir de mesures experimentals sobre l'angle d'inclinació de dues cordetes en què havien estat suspeses dues boletes carregades. El fet que hi hagi càrregues elèctriques positives i negatives, i que les càrregues del mateix signe s'atreugin, fa que les forces elèctriques, malgrat que tenen llarg abast quan actuen entre només dues partícules, tinguin efectes poc importants a llargues distàncies en cossos macroscòpics, ja que les càrregues positives neutralitzen les negatives i viceversa. En canvi, la gravitació, que és molt més feble que la força elèctrica, és la força dominant a

llarg abast, ja que les masses són sempre positives i, per tant, produeixen sempre una força gravitatòria atractiva.

La primera idea del caràcter discret de les càrregues elèctriques fou formulada el 1840 per Weber i Fechner. El 1873, Faraday, a partir de nombrosos experiments d'electròlisi, proposà la llei de conservació de la càrrega elèctrica. El 1897, G. J. Stoney donà el nom d'*electró* a la unitat natural de càrrega d'un ió monovalent i, el mateix any, J. J. Thomson descobrí que els raigs catòdics són partícules, els electrons. Fins al 1910, amb els experiments de Millikan, el valor de la càrrega de l'electró no fou coneguda amb precisió. Posteriorment fou descobert el protó, o nucli de l'hidrogen, que és un component de tots els altres nuclis atòmics. El neutró, en canvi, no fou descobert fins al 1932.

Totes les càrregues observades en la naturalesa són múltiples de la càrrega de l'electró. Les úniques càrregues fraccionàries són les dels quarks, que valen $2/3$ o $1/3$ de la càrrega de l'electró, però només han estat observades indirectament a l'interior del protó i del neutró, malgrat un gran nombre d'esforços dedicats a la seva observació directa. Una qüestió oberta, per ara, és per què la càrrega del protó té el mateix valor absolut que la de l'electró, si aquestes dues partícules no tenen cap relació entre elles. Explicar-ho és un dels objectius de les teories de gran unificació, que relacionarien leptons (entre els quals, l'electró) i quarks (entre els quals, u , de càrrega $2/3$, i d , de càrrega $-1/3$, i que són els constituents del protó, format per dos quarks u i un d , i el neutró, format per un quark u i dos d).

1.1.4.2. Càrrega de color

La càrrega elèctrica no és l'única mena de càrregues que presenta la naturalesa. El 1965, Han i Nambu proposaren que els quarks, a més de càrrega elèctrica, tenen una altra mena de càrrega, anomenada *càrrega de color*, tot i que no té res a veure amb els colors habituals. La força de color difereix de l'elèctrica, entre d'altres aspectes, en el fet que és més intensa com més gran és la separació entre els quarks, cosa que dificulta que aquests puguin ser observats aïlladament. Aquestes càrregues s'anomenen *vermell*, *verd* i *blau*, i la interacció entre elles produeix la interacció nuclear forta, que manté la cohesió dels nuclis atòmics malgrat les forces electros-

tàtiques repulsives entre els protons. La interacció entre els quarks s'esdevé mitjançant l'intercanvi d'unes partícules anomenades *gluons*, que també tenen càrrega de color, en concret, vuit càrregues possibles (les combinacions verd+vermell, verd-vermell, vermell-verd, blau+vermell, blau-vermell, blau+verd, blau-verd, verd-blau). Per aquesta nomenclatura, la teoria actual de les interaccions entre els quarks és anomenada *cromodinàmica quàntica*, en analogia amb l'electrodinàmica quàntica.

Els quarks tenen la particularitat de presentar-se sempre en combinacions neutres pel que fa al color i que corresponen o bé a conjunts de tres quarks amb tres colors diferents (i que donen lloc a *barions*, partícules pesants) o bé un quark d'un color i un altre quark de l'anticolor corresponent (i que donen lloc a *mesons*, partícules de massa intermèdia). Tal com la càrrega elèctrica, la càrrega de color també és una magnitud conservada.

1.1.4.3. Càrregues bariòniques i d'estranyesa

Altres càrregues més inusuals han sorgit no tant per l'evidència directa d'una força, sinó per la constatació que algunes transicions o reaccions són observades molt sovint, mentre que d'altres no són observades gairebé mai. És natural que hom hagi buscat criteris de selecció per tal de comprendre per què les unes són molt més probables que les altres. Aquests criteris estan basats en la conservació de nombres quàntics que caracteritzen els estats inicial i final de les transicions. En veurem dos exemples: el nombre bariònic (o càrrega bariònica) i l'estranyesa.

Recordem que els barions són hadrons (partícules capaces d'interacció nuclear forta) pesants. Els barions més freqüents són, amb diferència, els protons i els neutrons, als quals cal afegir diverses partícules exòtiques, observades tan sols en els raigs còsmics o en acceleradors, anomenades col·lectivament *hiperons*. S'observa que el nombre de protons més neutrons més hiperons és sempre conservat. El 1953, Wigner proposà un nombre bariònic o càrrega bariònica que es conservaria en les reaccions: protons, neutrons i hiperons hi contribueixen en una unitat. Això implicaria que el protó hauria de ser absolutament estable, perquè és el barió més lleuger i no es pot descompondre, doncs, en barions encara més lleugers. Algunes teories de gran unificació han apuntat la possibilitat que la

conservació del nombre bariònic no fos estricta i que el protó pogués desintegrar-se. Això permetria, per exemple, una desintegració com $p = e^+ + e^- + e^+$. La manca d'observacions d'aquest esdeveniment, malgrat un gran esforç experimental, indica que la vida mitjana del protó, si realment es desintegra, és més llarga que l'edat de l'Univers.

L'estranyesa és un nombre quàntic proposat per Gell-Mann i que tenia en compte que algunes partícules inestables tardaven bastant a desintegrar-se. Per exemple, la reacció $\lambda = p + \pi$ és molt més lenta que no pas $p + p = \lambda + p + K^+$. La idea de Gell-Mann és que la segona reacció conservaria l'estranyesa, mentre que la primera no perquè la partícula K^+ té estranyesa 1, la partícula λ -1 i el protó i π , estranyesa 0. L'estranyesa no es conserva estrictament, però les reaccions que la conserven són molt més ràpides que les que no la conserven.

Les càrregues bariòniques i d'estranyesa han estat interpretades posteriorment en funció dels quarks: el nombre bariònic és la diferència del nombre total de quarks menys el d'antiquarks dividida per tres i la seva conservació se segueix de la del nombre total de quarks. La càrrega d'estranyesa s'interpretà com el nombre de quarks estranys (quarks s) que formen les partícules corresponents. Per exemple, l'estranyesa 1 de la partícula K^+ vol dir que en ell hi ha un quark s ; l'estranyesa 0 del protó vol dir que en ell no hi ha cap quark s , i l'estranyesa -1 de la partícula λ significa que conté un antiquark s .

En definitiva, hem subratllat dos aspectes principals de les càrregues: el més conegut és la seva relació amb la potencialitat de produir i experimentar certs tipus de forces, com les elèctriques i les nuclears fortes. Els signes diferents de les càrregues elèctriques presenten el món material com un joc d'atraccions i repulsions. El dinamisme de la realitat, però, no sempre és resultat de càrregues. Així, la força magnètica, més coneguda que no pas l'electrostàtica, no té associada una càrrega magnètica, sinó que és deguda al moviment de càrregues elèctriques. El segon aspecte, directament relacionat amb lleis de conservació, es refereix a quines reaccions són possibles i quines no. Entre els problemes oberts més rellevants destaca la qüestió de per què la càrrega del protó és igual (en valor absolut) a la de l'electró, malgrat que ambdues partícules pertanyen a famílies completament diferents (hadrons i leptons, respectivament).

1.2. LES CONSTANTS FÍSQUES UNIVERSALS

Les constants físiques són coeficients constants universals que apareixen en les equacions que expressen les lleis físiques fonamentals, sovint en aquelles que especifiquen les forces elementals entre les partícules. Per ara, només poden ser determinades per mesurament, però no hi ha cap teoria fonamental que doni relacions entre elles o que permeti predir-ne els valors. Els valors d'aquestes constants (recollits a la taula 2 de la pàgina 42) han rebut nova atenció des de la constatació que si algun d'ells fos lleugerament diferent del que és, l'Univers seria molt diferent, de manera que no hi hauria nuclis més pesants que el carboni ni molècules que poguessin donar lloc a éssers vius. Per això hi ha un gran interès en el significat i el valor d'aquestes constants.

1.2.1. *Gravitació: la constant de Newton*

La primera constant universal introduïda en la física fou la que apareix en la llei de la gravitació de Newton, definida el 1687 en la cèlebre equació que descriu la força entre dos cossos de masses m_1 i m_2 separats una distància r :

$$F = G (m_1 \cdot m_2) / r^2$$

El pas més agosarat de Newton fou suposar que aquesta fórmula val no solament per descriure la força entre el Sol i els planetes, sinó també entre la Terra i la Lluna, i que és una llei universal que descriu la interacció entre dos objectes qualssevol. Aquesta hipòtesi fou confirmada, per exemple, per la constatació que la relació entre radis i períodes orbitals satisfà la tercera llei de Kepler no tan sols per als planetes sinó també per als satèl·lits de Júpiter i altres planetes, i per l'èxit de la predicció del període de retorn del cometa Halley. Un dels aspectes més enigmàtics i discutits de la llei de la gravitació és el caràcter d'acció immediata a distància, és a dir, com es transmet aquesta força a través del buit. La relativitat general d'Einstein reinterpreta la gravitació en termes de geometria de l'espai-temps i recupera la llei de Newton com un límit particular. Tot i això, la constant G té en la teoria einsteiniana la mateixa importància que en la newtoniana.

Mesurar G és molt difícil ja que les forces gravitatòries entre dos objectes són habitualment petites: per exemple, la força gravitatòria mútua entre dues esferes de 50 kg separades 10 cm val $1,6 \times 10^{-5}$ N, mentre que el pes de cada esfera (força amb què l'atreu la Terra) val $4,9 \times 10^2$ N. La constant de la gravitació fou mesurada detalladament per primera vegada un segle després de Newton, per Henry Cavendish el 1798, que utilitzà una balança de torsió ideada el 1784 per Coulomb. El seu article es titulava «Experiments to determine the density of the Earth», ja que, conegut el valor de G , el del radi R de la Terra i el de la gravetat g en la seva superfície, la relació anterior permet deduir-ne la massa M de la Terra, segons la relació $g = GM/R^2$.

L'increment en la precisió d'aquesta constant ha estat molt lent: un ordre de magnitud per segle. Des de 1970, hi ha hagut una quarantena d'experiments diferents destinats a mesurar G amb precisió creixent. El gran interès en el valor de G es deu a diversos motius:

— Per al coneixement de la cosmologia, és imprescindible conèixer G , la qual determina el ritme d'expansió de l'Univers i el seu futur a llarg termini. Aquest futur pot correspondre a una expansió indefinida o a una expansió màxima seguida d'una reconstrucció. Quina mena de futur tindrà l'Univers depèn de la densitat mitjana d'energia ρ i del ritme d'expansió, determinat per la constant de Hubble, H , donada pel quocient entre la velocitat amb què s'allunyen dues galàxies i la distància que les separa. Si la densitat ρ és superior a una densitat crítica ρ_c donada per $\rho_c = H^2/(8\pi G/3)$, l'expansió futura seria limitada; en cas contrari, indefinida. Segons el valor observat actualment de H , el valor de la densitat crítica seria d'uns tres nuclis d'hidrogen per quilòmetre cúbic. Els estudis recents apunten que, malgrat la incertesa en la densitat de massa, l'expansió serà indefinida i, fins i tot, suggereixen que l'expansió és accelerada.

— A través de la velocitat d'expansió de l'Univers, el valor de G repercuteix també en els detalls fins de la nucleosíntesi primordial, o formació dels nuclis dels elements lleugers, en especial hidrogen, heli 4, deuteri, liti i heli 3. L'abundància relativa d'aquests resulta important per a una estimació dels límits de la massa bariònica de l'Univers, és a dir, per a la contribució de la matèria usual a la massa total de l'Univers, que està dominada, segons es creu, per una matèria fosca de naturalesa desconeguda.

— En astrofísica, la constant G determina la distribució radial de pressió i temperatura en les estrelles i, indirectament, el ritme de la seva evolució. Aquesta depèn d'un equilibri entre la tendència gravitatòria a contreure's i la tendència tèrmica a dilatar-se, de manera que la temperatura en què es troba l'estrella en equilibri està relacionada amb el radi, la massa i G . Les estrelles grans han de cremar més ràpidament i duren menys que les petites.

— En geofísica, el coneixement precís de G és important per a la prospecció de jaciments subterranis i per a l'estudi de la densitat del terreny a partir d'anomalies gravimètriques.

— En astronàutica, per al càlcul molt detallat de les òrbites dels satèl·lits i, en especial, d'aquells que donen l'hora i les posicions en el sistema de posicionament global, i per als estudis de la distància Terra-Lluna i de la dinàmica detallada del relleu terrestre. També és important aprofitar la força gravitatòria dels diversos planetes per optimitzar les trajectòries dels coets d'exploració de planetes distants, de manera que consumeixin un mínim de combustible.

A més d'aquests motius més o menys pragmàtics, l'exploració d'una possible variació de G amb la distància i amb el temps, no contemplada en la llei de Newton, però que no pot ser exclosa a priori, té gran interès per a d'altres qüestions més fonamentals:

— La variació de G amb la distància té interès per dos motius. D'una banda, podria dur a separacions respecte del comportament de la força com r^{-2} a gran distància (en concret, a distàncies de l'ordre del radi de la galàxia, molt més grans, doncs, que la del sistema solar) que podrien explicar perquè les galàxies giren, sense trencar-se, molt més ràpidament del que els ho permetria la massa total observada. L'explicació usual és que la massa observada només és una petita part de la total, gran part de la qual seria deguda a la matèria fosca. Una altra modificació interessant de la llei de Newton podria ser a distància mitjana, de l'ordre de metres, on s'ha especulat amb l'existència d'una cinquena força, proposada a principis dels vuitanta, que podria dependre del tipus de matèria i no tan sols de la massa.

— La variació de G amb el temps va ser proposada per Dirac el 1930, en constatar que el nombre de protons en l'univers observable és de l'ordre de 10^{78} , i que el quocient entre les forces electro-magnètiques i les gravitatòries és 10^{39} , l'arrel quadrada del valor anterior. Ara bé: l'univers observable va creixent amb el temps. Dirac es preguntà si seria possible que G o c variessin amb el temps de

manera que sempre es mantingués la relació (raó forces elèctriques i gravitatòries)² = nombre d'àtoms en l'univers observable. L'univers observable augmenta amb el temps, mentre que el quocient de les forces depèn de constants, entre les quals G ; una manera d'aconseguir que la igualtat es mantingués seria que G variés amb el temps. Aquesta idea va generar molts treballs teòrics, però els resultats de recerques experimentals molt acurades indiquen que G no pot haver variat en més d'un u per cent en tota la història de l'Univers, un canvi cent vegades més petit que el proposat per Dirac.

1.2.2. Constants elèctriques i magnètiques i càrrega de l'electró

Dues altres constants universals de la física apareixen en les lleis de l'electricitat i el magnetisme. El 1785, Coulomb establí experimentalment la llei de la força entre dues càrregues elèctriques q_1 i q_2 immòbils i puntuals separades una distància r , i que ve donada per la relació

$$F = K_1 q_1 q_2 / r^2 = (1/4\pi\epsilon_0)(q_1 q_2 / r^2)$$

ϵ_0 s'anomena *permitivitat elèctrica* de l'espai lliure i K_1 (donada per la inversa de $4\pi\epsilon_0$) és una constant universal que val $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

El 1819, Oersted posà de manifest que un corrent elèctric produeix una força magnètica sobre una brúixola. Immediatament, els estudis de magnetisme prengueren un ritme accelerat i poc temps després Ampère establí que la força per unitat de longitud entre dos fils paral·lels pels quals passen corrents d'intensitat I_1 i I_2 separats una distància r és

$$F/l = K_2 I_1 I_2 / r = (\mu_0/2\pi) I_1 I_2 / r$$

on μ_0 és la permeabilitat de l'espai lliure i K_2 (donada per $\mu_0/2\pi$) és una constant universal que val $2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

Les constants K_1 i K_2 tenen un paper molt important en la física; cal saber, però, que si en lloc de trobar-se en el buit o en l'aire, les càrregues estiguessin submergides en un altre material (aigua, alcohol, benzè, metà, etc.) aquestes constants haurien de ser modificades en uns factors, anomenats *constant dielèctrica relativa* i *permeabilitat magnètica relativa*, respectivament, que depenen del material. Tor-

nem, però, a la situació de les forces en el buit. Les lleis que acabem de presentar donen dues maneres de definir la càrrega elèctrica, a partir de la llei de Coulomb o a partir de la d'Ampère, possibilitats que han donat lloc a diversos sistemes d'unitats electromagnètiques. Actualment, la llei d'Ampère és utilitzada per a definir l'Ampère, que és considerat una unitat fonamental en el sistema internacional, mentre que el Coulomb és definit com la càrrega elèctrica que flueix en el pas d'un corrent d'un Ampère durant un segon.

El 1865, Maxwell formulà la teoria de l'electromagnetisme, una de les unificacions matemàtiques més poderoses i belles de fenòmens físics molt diversos. Aquesta teoria unificada d'electricitat i magnetisme el dugué a la conclusió que hi ha ones electromagnètiques que es mouen amb una velocitat donada per

$$c = 1/(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} = (2K_1/K_2)^{1/2} = (2 \times 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 / 2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)^{1/2} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

és a dir, 300.000 km/s. Aquest valor és precisament el de la velocitat de la llum en el buit, cosa que portà Maxwell a la conclusió que la llum és una ona electromagnètica. Poc després, Hertz produí per primera vegada ones electromagnètiques artificialment i controladament, que foren aprofitades molt poc després per Marconi per a la telegrafia sense fils, iniciant així l'era de les comunicacions per ones electromagnètiques. Com veurem immediatament, la velocitat de la llum en el buit va ser elevada a la categoria de constant universal per la relativitat especial d'Einstein.

La càrrega i la massa de l'electró aparegueren a la física el 1897, quan Thomson descobrí l'electró a partir de l'estudi dels raigs catòdics. Inicialment, hom parlà només de la càrrega, com si es tractés d'un àtom d'electricitat, ja proposat per Helmholtz el 1881. La càrrega i la massa foren mesurades per primera vegada per R. A. Millikan, que va obtenir el Premi Nobel de 1923 per aquest fet, i són també constants universals de la naturalesa. Les possibilitats d'explorar les interaccions electró-electró amb energies cada cop més elevades ha dut a descobrir anomalies respecte de la llei de Coulomb, en què K_1 varia amb la distància per la polarització del buit quàntic. En altres termes, hom pot considerar com si la càrrega de l'electró variés amb la distància. A distàncies normals, les fluctuacions del buit n'apantallen una part, però si ens hi acostem a escales subatòmiques, la càrrega aparent va creixent, com si es-

quincèssim cortines de buit i veiéssim l'electró cada vegada més nu i més carregat.

1.2.3. *La velocitat de la llum*

La teoria de la relativitat i la mecànica quàntica, sovint presentades, erròniament, com manifestacions de relativisme i indefiniició, aporten a la física unes noves constants fonamentals: la velocitat de la llum i la constant de Planck, respectivament.

La velocitat de la llum fou mesurada per primer cop pel danès O. Roemer el 1676 a partir de les observacions dels eclipsis d'un satèl·lit de Júpiter, Ió. S'observa que aquests eclipsis es retarden uns 16,6 minuts quan la distància entre la Terra i Júpiter és màxima, respecte del moment en què caldria esperar que es produïssin quan la distància és mínima. Roemer atribuï aquest retard al temps que tarda la llum a recórrer el diàmetre de l'òrbita terrestre i trobà per a la velocitat de la llum un valor d'uns 215.000 km/s, valor molt elevat (tot i que considerablement inferior al valor correcte, ja que el valor emprat per al radi de l'òrbita terrestre no era prou ben conegut), però que posà de manifest el caràcter no instantani de la propagació lluminosa.

El 1849, L. Fizeau ideà un nou mètode de mesura, amb una roda dentada i un mirall, que no havia d'acudir a l'astronomia. La idea era fer girar la roda al davant d'un raig de llum, el qual era enviat a un mirall situat a uns vuit quilòmetres de distància. La roda es fa girar cada vegada més ràpidament fins que el temps que la llum tarda a anar i tornar és el temps que tarda un forat entre les dents de la roda a ser substituït pel forat següent en la rotació de la roda. Aquest mètode donà un valor d'uns 315.000 km/s, lleugerament superior al correcte. J. Foucault en va proposar el 1868 una modificació que utilitzava un mirall giratori i exigia un espai de tan sols uns quants metres, que podia ser aplicada per trobar el valor de la velocitat de la llum en medis transparents i no només en l'aire, i que tenia una precisió més elevada que els mètodes anteriors, amb un marge d'error d'uns 500 km/s.

El nordamericà Michelson en féu la primera mesura de gran precisió amb mètodes d'interferometria, amb un marge d'error de menys de 2 km/s, i posà de manifest, en un cèlebre experiment fet conjuntament amb E. W. Morley, el 1887, que no es posava en

evidència cap moviment de la Terra respecte de l'èter. La precisió té una gran importància i hom segueix treballant en l'increment de la precisió (la precisió era de 1,4 km/s, el 1948, amb mesures fetes amb radar; el 1967, amb làser, s'havia arribat a una precisió de 0,15 km/s). Actualment, el valor de c és una magnitud fonamental i es pren com 299.792.458 m/s exactament, i a partir d'ella i del segon es defineix el metre.

Com hem recordat anteriorment, Maxwell relacionà la velocitat de la llum amb la permitivitat elèctrica i la permeabilitat magnètica del buit o del medi en què es propaga. La velocitat de la llum fou considerada com una velocitat més, fins que el 1905 Einstein proposà, entre les hipòtesis de la teoria especial de la relativitat, el seu caràcter de constant universal, i de velocitat màxima assolible. Per a Einstein, la velocitat de la llum en el buit és la mateixa per a tots els espectadors, independentment de la velocitat de la font emissora. Això és compatible amb els resultats dels experiments de Michelson i Morley i fa que les equacions de Maxwell siguin invariants per a tots els observadors inercials. La constància de la velocitat de la llum per a tots els observadors desafia la intuïció de l'experiència quotidiana i modifica dràsticament els conceptes d'espai, temps i massa, com ho veurem en el capítol tercer.

1.2.4. *Atomisme: la constant de Boltzmann*

La constant d'Avogadro és el nombre de partícules per mol, i per això té un significat molt profund pel que fa a l'existència dels àtoms i a la relació entre el món macroscòpic i el microscòpic. El nombre de molècules és sempre el mateix en iguals volums de gasos qualssevol, a la mateixa temperatura i pressió. Amadeo Avogadro establí aquesta llei per conciliar la hipòtesi atomística de Dalton amb la llei de Gay-Lussac (1808), però el seu mèrit no fou reconegut fins al 1860, en el primer congrés internacional de químics, quatre anys després de la seva mort.

El nombre d'Avogadro permet passar de magnituds macroscòpiques a magnituds microscòpiques, i per això tingué un paper molt important en la legitimació de l'atomisme. Perrin, en el seu llibre *Les atomes*, de 1910, recull tretze maneres diferents de mesurar el nombre d'Avogadro (basades, per exemple, en el moviment brownià, en la distribució de partícules suspeses en un fluid en fun-

ció de l'altura, etc.). El fet que totes aquestes avaluacions donessin aproximadament el mateix valor per a aquest nombre fou decisiu per a l'adopció definitiva de la hipòtesi atomística, a començaments del segle XX.

Molt sovint, en lloc de parlar del nombre d'Avogadro com a constant física fonamental, hom es refereix a la constant de Boltzmann, que és la constant dels gasos ideals dividida pel nombre d'Avogadro $k = R/N_A$, i que té un paper primordial en física estadística. Aquesta constant relaciona l'energia cinètica molecular mitjana de translació de les molècules d'un gas amb la temperatura absoluta T , de manera que la primera val $(3/2)kT$, relació que permet interpretar la temperatura absoluta com a grau d'agitació molecular del gas.

1.2.5. *La constant de Planck*

Aquesta constant apareix per primer cop en els treballs de Planck sobre la radiació del cos negre a les acaballes de 1900, i relaciona la freqüència f de la radiació amb el quàntum d'energia, segons la fórmula $E = hf$. Segons Planck, l'energia electromagnètica no es bescanviaria en quantitats arbitràries, sinó tan sols en múltiples del quàntum elemental hf . Naixia així la mecànica quàntica.

Einstein aplicà, el 1905, aquestes idees a l'efecte fotoelèctric i, el 1907, a la calor específica dels sòlids. El 1913, Bohr les aplicà a la descripció de l'estructura de l'àtom d'hidrogen, i assolí per primera vegada una explicació molt elegant i simple del conjunt de freqüències de la radiació emesa o absorbida per aquest àtom: des d'aquell moment, les idees quàntiques irromperen poderosíssimament en la física i concentraren en el món atòmic i molecular l'interès dels investigadors.

La constant de Planck adquireix una nova profunditat conceptual amb el principi d'indeterminació de Heisenberg, formulat el 1925, segons el qual el producte de la imprecisió en la quantitat de moviment per la imprecisió en la posició ha de ser més gran o igual que la constant de Planck, és a dir,

$$\Delta x \Delta(mv) > h$$

Aquesta relació imposa un límit absolut a les possibilitats d'observació del món microfísic o, més profundament encara, indica que la manera de ser del món microfísic és diferent de la del món

macrofísic. Alhora, aquest principi trenca la idea de determinisme de la física clàssica, ja que per tal de determinar el moviment cal conèixer exactament la posició i la velocitat inicials del mòbil; si això no és possible, deixa de valdre el determinisme.

La primera interpretació de la relació d'indeterminació fou referida a les possibilitats de mesura: com que en la física clàssica no hi ha límit inferior a l'energia de les ones, és possible, en principi, observar un objecte sense produir-li cap alteració; en canvi, en la física quàntica, si emprem una radiació de freqüència f per a observar un objecte, la quantitat mínima d'energia val hf , per tant, modifica l'objecte de manera apreciable, especialment com més petita és la seva massa. Però això suposa que, si no fem cap mesura, l'objecte —posem per cas un electró— té posició i velocitat ben definides. La física quàntica ha anat més enllà, però, i ha arribat a la conclusió que, quan no en mesurem la posició ni la velocitat, l'electró no té posició ni velocitat, sinó que és una entitat no local que ocupa simultàniament tot l'espai. Les conseqüències d'aquest darrer punt de vista, tan sorprenent, han estat comprovades a partir d'experiments suggerits per les desigualtats deduïdes per John Bell, el 1964, i duts a terme pel grup d'A. Aspect a París, el 1980, i per altres grups posteriorment. La constant de Planck, doncs, intervé profundament en la nostra visió del món, tant pel que fa a l'existència d'una realitat objectiva independent de l'observador com pel que fa al determinisme de la realitat.

TAULA 1. Masses i càrregues elèctriques de les partícules elementals.

<i>Quarks</i>			<i>Leptons</i>		
	càrrega	massa		càrrega	massa
u	2/3	5 MeV	e	-1	0,5 MeV
d	-1/3	10 MeV	ν_e	0	0 MeV
c	2/3	1500 MeV	μ	-1	105,7 MeV
s	-1/3	200 MeV	ν_μ	0	0 MeV
t	2/3	175000 MeV	τ	-1	1784 MeV
b	-1/3	5000 MeV	ν_τ	0	0 MeV

El temps i la memòria en la ciència contemporània

TAULA 2. Valors d'algunes constants físiques i dates en què són proposades i mesurades per primer cop.

Constant de la gravitació	1687	G	$6,67259 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$
Nombre d'Avogadro		N_A	$6,022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constant de Boltzmann		k	$1,380662 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Càrrega de l'electró	1897	e	$1,6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$
Massa en repòs de l'electró	1897	m_e	$9,109534 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Velocitat de la llum en el buit		c	$2,99792458 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Constant de Planck	1900	h	$6,626176 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
Massa en repòs del protó		m_p	$1,6726485 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa en repòs del neutró	1932	m_n	$1,6749543 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Constant de Faraday		F	$9,648456 \times 10^4 \text{ C/mol}$
Constant de Rydberg		R	$1,0973731 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
Constant de Stefan-Boltzmann	1867	σ	$5,6703271 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^4$

1.2.6. Les masses de les partícules elementals

Les masses en repòs de les diverses partícules elementals són unes altres constants de la naturalesa, per ara no explicades en la teoria. Segons les teories actuals, les partícules més elementals són els quarks i els leptons. Els segons són susceptibles d'interaccions electromagnètiques i interaccions nuclears febles, però no de les nuclears fortes. Els primers, en canvi, tenen totes tres menes d'interacció i es combinen de tres en tres o de dos en dos per donar els hadrons. Les masses i càrregues de quarks i leptons venen donades a la taula adjunta.

Crida l'atenció, per exemple, veure la gran disparitat entre aquestes masses. Els valors de les masses de les partícules elementals són, per ara, experimentals, i un dels objectius de les teories més aprofundides és explicar-ne les relacions. Un altre tema de recerca molt actiu és esbrinar si les masses dels neutrinos són realment nul·les, qüestió de gran importància en astrofísica (problema dels neutrinos solars) i en cosmologia (problema de la matèria fosca).

1.2.7. Qüestions conceptuals

Podríem parlar d'altres constants relacionades amb les forces nuclears febles o amb les interaccions fortes, però això ens faria en-

trar en territoris massa especialitzats, més enllà del propòsit de síntesi d'aquest llibre. Ací, doncs, acabem el tema de les constants tot parlant de tres qüestions d'especial interès conceptual.

a) Sensibilitat de l'Univers a les constants: principi antròpic

Aquesta qüestió es posa cada vegada amb més acuitat, ja que hom ha constatat que petites modificacions en els valors de les constants durien a un univers sense àtoms ni matèria orgànica, molt diferent de l'Univers en què vivim. Per exemple, valors més petits de G duen a un univers que s'expandeix massa ràpidament, i valors massa grans porten a un univers que es contreu massa d'hora. Disminuir o augmentar la càrrega de l'electró o la permitivitat del buit influeix en l'estabilitat dels àtoms i les molècules, que esdevenen massa rígids o massa inestables per poder donar lloc a molècules complexes i a la vida. La formació de carboni (pas necessari per formar tots els nuclis de massa superior) exigeix una sintonització acuradíssima de la constant de Planck, la càrrega de l'electró i la constant de la interacció feble. Per això, hom ha especulat si aquestes sintonitzacions especials són el disseny d'un Creador, o bé si són un simple atzar —i hi ha molts universos amb valors diferents i aleatoris de les constants—, o bé si hi ha una teoria que doni les relacions entre els valors de les constants.

b) Les constants i les fronteres del coneixement

Ja hem indicat com algunes de les constants universals estan relacionades amb els límits del coneixement i de la realitat: la velocitat de la llum estableix un límit superior a les velocitats amb què pot ser transferida la informació; la constant de Planck expressa limitacions en la precisió amb què podem conèixer les característiques del món microscòpic. Algunes combinacions especials de les constants ajuden a reflexionar sobre els límits de les teories actuals per entendre l'estructura més fina de l'espai-temps. Els anys vint, Planck combinà les constants fonamentals més importants, h (quàntica), c (electromagnetisme) i G (gravitació), per donar unitats de longitud, de massa i de temps. Aquestes unitats de Planck són

El temps i la memòria en la ciència contemporània

$$\text{Longitud de Planck} = (Gh/2\pi c^3)^{1/2} \approx 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$\text{Temps de Planck} = (Gh/2\pi c^5)^{1/2} \approx 5,4 \times 10^{-44} \text{ s}$$

$$\text{Massa de Planck} = (ch/2\pi G)^{1/2} \approx 2,2 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

En la definició d'aquestes magnituds hi intervenen electromagnetisme, gravitació i quàntica. Aquests valors, doncs, indiquen les distàncies, temps i masses a partir dels quals és imprescindible una teoria quàntica de la gravitació, encara no existent amb tota generalitat, i fixen els límits de validesa de la física actual. Per sota d'aquests valors, l'espai-temps podria ser discontinu, una mena d'es-cuma fluctuant i irregular.

c) Relacions entre constants

El gran nombre de constants que intervenen en les teories actuals (una vintena) invita a buscar una teoria més profunda amb menys constants indeterminades. Per això, hom busca relacions entre les diverses constants físiques. Per ara, hi ha algunes coincidències numèriques curioses assolides tot combinant de manera adient diverses constants, però no hi ha cap teoria subjacent que permeti relacionar-les. Podria ser que una teoria unificada de les forces ens arribés a donar relacions entre constants i a reduir, doncs, el nombre de constants independents. Un exemple històric de reducció de constants físiques en passar a una teoria més profunda el trobem en l'aplicació de la física quàntica a la radiació del cos negre i als espectres atòmics: les constants de Stefan-Boltzmann i de Rydberg que hi apareixen van poder ser expressades en funció d' h , c i e , i deixaren de ser considerades constants veritablement fonamentals.

1.3. LES SIMETRIES

Ens hem referit a les lleis de conservació com a la constància de certs nombres en el temps. Hom podria imaginar altres tipus d'invariàncies, contínues o discretes, que s'anomenen en termes generals *simetries* i que constitueixen un element molt atractiu, per la seva bellesa formal i lògica i per la simplificació que aporten a les solucions possibles d'un problema. Les simetries constitueixen un dels lligams més visibles entre l'argumentació estètica i les teories físiques,

tot i que plantegen diverses qüestions lògiques com si són una propietat de la naturalesa o un principi de comprensió de la nostra ment.

En l'antiguitat, les simetries ja foren utilitzades en ciència. Per a Anaximandre, la Terra estava situada al centre de l'Univers per una qüestió de simetria. Per a Parmènides, la invariància de l'Ésser es manifestava en homogeneïtat i isotropia. Per a Plató, la simetria circular era un imperatiu per a les òrbites dels planetes, i la simetria dels políedres regulars era un element essencial en la constitució dels àtoms. En la medicina antiga, els quatre elements es relacionaven per simetria amb els quatre humors (sang, flegma, bilis negra i bilis groga) en una de les moltes exploracions de possibles simetries entre el cosmos exterior i el món interior que constitueixen la base de les creences astrològiques. Ramon Llull utilitzà les simetries en l'*Art combinatòria* per a establir una taxonomia lògica dels sabers i potenciar-ne les relacions. Copèrnic suposà que el Sol és al centre del sistema solar per a eliminar una asimetria entre planetes exteriors i interiors. Gassendi utilitzà arguments de simetria per translació espacial per a explicar la conservació del moment lineal; Descartes els utilitzà en l'estudi de les col·lisions, i Newton en la llei d'acció i reacció.

El paper de les simetries ha estat creixent en la física moderna: Einstein postulà una simetria entre llum (ondulatòria) i matèria (corpuscular) que el dugué al concepte de fotó, o quàntum corpuscular de la radiació lluminosa o electromagnètica; a partir d'una simetria anàloga, però en sentit oposat, De Broglie arribà al concepte d'ona associada al moviment de les partícules; Dirac establí una simetria entre la matèria i el concepte nou de l'antimatèria. Aquest paper s'ha anat accentuant, fins al punt d'esdevenir una de les guies més sòlides de les teories sobre partícules elementals, tal com ho destacarem en aquesta secció. En algunes ocasions, però, cal trencar la idea de simetria: per exemple, Kepler trencà la simetria circular en establir la llei d'òrbites el·líptiques i la física moderna ha trencat també algunes simetries molt profundes, com ho veurem en aquesta secció.

1.3.1. *Simetries i interaccions fonamentals*

Anomenem *simetria* la invariància d'un objecte, d'un procés, d'una llei, per un conjunt de transformacions, físiques o analítiques.

Podem distingir simetries en contextos diversos: en les propietats observades d'objectes o de processos, en els principis que guien la construcció de teories, en la classificació d'entitats físiques, o com a mètode per trobar la solució de problemes concrets. Per exemple, les simetries d'homogeneïtat i isotropia són importants en cosmologia, per trobar solucions de les equacions d'Einstein. També són importants per expressar restriccions sobre les formes possibles de les equacions que descriuen les interaccions fonamentals. Una altra simetria de les lleis físiques és la que hi ha entre les observacions fetes per observadors que es mouen l'un respecte de l'altre amb velocitat constant: per a Galileu, les lleis de la mecànica han de ser les mateixes per a tots els espectadors inercials. En ser descobertes les equacions de Maxwell per a l'electromagnetisme, hom advertí que no són invariants per les transformacions de Galileu. Per a aconseguir-ho, Einstein postulà que la velocitat de la llum és la mateixa en tots els sistemes i que totes les lleis de la física són les mateixes per a tots els espectadors inercials. Aquesta és la idea essencial de la teoria de la relativitat, que tractarem en el capítol tercer.

Les transformacions més immediates són els grups de simetria dels cristalls. Unes altres són les translacions en l'espai o en el temps, i les rotacions en l'espai. A aquestes transformacions corresponen, com ho féu notar Hamilton, les lleis de conservació de moment lineal, energia i moment angular, respectivament. La relació entre simetries i lleis de conservació fou aprofundida i generalitzada per Emmy Noether, una de les matemàtiques més famoses, en un cèlebre teorema de 1918, en què relacionà les simetries del Hamiltonià (Lagrangia) i les lleis de conservació.

Algunes de les simetries més usuals en la física de partícules, són les simetries T , P i C , que han estat de gran utilitat en l'exploració de les formes possibles de les interaccions elementals, i que descrivim tot seguit:

— *Inversió temporal T* . La simetria d'inversió temporal canvia el sentit del temps vers el futur pel sentit vers el passat, i postula que les lleis de la física han de ser invariants per aquesta transformació, que implica, en particular, invertir el sentit de les velocitats i transformar les absorcions en emissions i viceversa. Onsager fou el primer a utilitzar la invariància per inversió temporal de les trajectòries microscòpiques per deduir, el 1931, unes relacions de reci-

procitat entre les diverses forces termodinàmiques i els corresponents fluxos termodinàmics. Wigner, el 1932, utilitzà aquestes idees per tractar qüestions relacionades amb la mecànica quàntica (en concret, amb la forma de les probabilitats de transició entre nivells). L'atenció per aquesta simetria decaigué fins a finals dels anys cinquanta, en què hom demostrà la universalitat de la simetria *CPT*.

— *Paritat*. Es tracta de la simetria espacial respecte a un punt o, en altres paraules, de la simetria respecte a dreta i esquerra. Segons la simetria per operacions de paritat, les lleis de la física haurien de ser invariants per reflexió en un mirall. En altres paraules, si ens trobéssim en un espai buit, sense referències espacials properes, giravoltar en sentit dextrogiro hauria de produir exactament els mateixos efectes que giravoltar en sentit levògiro.

— *Conjugació de càrrega C*. Les idees sobre la matèria s'ampliaren amb la predicció de l'antimatèria per Dirac el 1931, i amb la seva observació: el 1932, Anderson trobà el primer positró, en raigs còsmics, el 1933 Blackett i Occhialini trobaren el primer parell d'electró-positró i el 1955 Segré descobrí els antiprotons. Segons la teoria, cada partícula elemental tindria en principi una antipartícula, de la mateixa massa però de càrrega elèctrica oposada, i caracteritzades pel fet que, si s'arriben a posar en contacte, desapareixen partícula i antipartícula tot donant lloc a radiació electromagnètica en forma de raigs gamma.

La conjugació de càrrega consisteix a canviar partícules per antipartícules i viceversa. Les lleis de Maxwell són invariants si hom canvia el signe de totes les càrregues. Anàlogament, la simetria per conjugació de càrrega postula que la forma de les interaccions fonamentals (en particular, les nuclears fortes i febles) haurien de ser invariants si canviéssim partícules per antipartícules i viceversa. Uns primers assaigs en aquests sentit poden ser trobats en Heisenberg, Pauli, Weisskopf i E. Majorana entre 1934 i 1937. Entre 1939 i 1953, aquesta simetria és pràcticament oblidada.

— *Teorema CPT*. Tot i que les simetries *C*, *P* i *T* semblen força lògiques i semblaven dur a conclusions plausibles en tots els fenòmens coneguts, fins al 1955 no tenien una base teòrica. Pauli i Ludders demostraren el 1956 que qualsevol tipus d'interacció que satisfaci la invariància relativista ha de ser invariant per l'aplicació

conjunta de les tres transformacions C , P i T . Aquest resultat, molt general i important, és el teorema CPT .

1.3.2. *Ruptura de simetries*

Tot i que la simetria és una bona guia per a formular lleis físiques, algunes simetries es trenquen. Per exemple, Kepler hagué de trencar la simetria circular de les òrbites planetàries i reconèixer el seu caràcter el·líptic; Gilbert, que imaginà que la interacció gravitatòria de la Terra podria tenir una analogia amb el magnetisme, suposà que l'eix del magnetisme terrestre coincidia amb l'eix de rotació, però posteriorment es veié que no és així, ja que l'eix magnètic es mou respecte del geogràfic. La ruptura de simetries té gran interès en la física de partícules elementals. Fins al 1957 es va pensar que tots els fenòmens físics eren invariants per les tres operacions de simetria P , C i T per separat. Les interaccions fortes i les electro-magnètiques, en efecte, ho són. El 1957 es descobrí, però, que les interaccions febles no són invariants ni per P ni per C , tot i que sí per PC . Aquesta ruptura renovà poderosament l'interès en aquestes simetries i en l'enigma de la seves limitacions.

1.3.2.1. Ruptura de la paritat

Un exemple de ruptura de simetria entre dreta i esquerra el trobem en biologia, on els sucres consumits per les cèl·lules són dextrògirs, mentre que els levògirs no són metabolitzats. Semblava inconcebible, però, que a nivell de partícules elementals fos possible distingir entre dreta i esquerra. El 1956, Dalitz féu notar que les artícules theta i tau, que semblaven idèntiques, es desintegraven la primera en dos pions i la segona en tres. La semblança entre les dues partícules era tan gran, però, que hom començà a preguntar-se si totes dues partícules eren de fet la mateixa, i s'esdevenia un trencament de la simetria de paritat (ja que dos pions tenen paritat parell i tres pions paritat senar). C. N. Yang i T. D. Lee estudiaren amb generalitat les implicacions d'una ruptura de simetria de paritat en la interacció feble, i van predir que hauria de ser contrastable experimentalment en una asimetria, al llarg del camp magnètic, de la desintegració beta de nuclis polaritzats. A principis del 1957, Wu, observà aquesta asimetria i el 1958 Yang i Lee

reberen el premi Nobel, un dels més immediats de la història. A nivell elemental, la no invariància de P es posa de manifest en el fet, descobert el 1958, que només hi ha neutrinos levògirs (espín oposat a la direcció del moviment) i antineutrinos dextrògirs (espín en la mateixa direcció del moviment), però no a la inversa.

1.3.2.2. Ruptura de CP

Alguns fenòmens (com la desintegració del mesó K neutre) no són invariants per CP. La descoberta fou feta per Cronin i Fitch el juliol de 1964 (van rebre el premi Nobel el 1980), en observar que el ritme de desintegració del K neutre donant dos pions és molt més petit que quan en dóna tres. A més, el 1966 fou descobert que el ritme de desintegració del K neutre en $e^+ + \pi^- + \nu$ és lleugerament més gran que no pas el ritme de desintegració de l'anti- K neutre donant $e^- + \pi^+ + \nu$. El K neutre és l'única partícula coneguda que trenca la simetria CP. Segons el teorema CPT, això implica una ruptura de la simetria T d'inversió temporal, cosa que suposa una fletxa del temps microscòpica, força enigmàtica.

1.3.2.3. Matèria i antimatèria en l'Univers

En principi, el descobriment de l'antimatèria suggerí una simetria entre matèria i antimatèria, semblant a la que trobem entre càrregues elèctriques positives i negatives. Ara bé, en el nostre entorn només observem matèria. L'antimatèria hi és produïda artificialment o bé és trobada esporàdicament en els raigs còsmics o en algunes reaccions nuclears. Per salvar la simetria entre matèria i antimatèria es va proposar, cap als anys trenta, que hi hauria galàxies de matèria i galàxies d'antimatèria, prou separades com per no interaccionar i anihilar-se. Ara bé, en la física no hi ha processos que duguin de manera natural a la separació de matèria i antimatèria a gran escala.

Per això, la ruptura d'aquesta simetria ha intrigat molt els físics. La ruptura de CP portà Sajarov a conjecturar que potser inicialment hi havia tantes partícules com antipartícules, però que un cert tipus d'antipartícules es desintegraven amb un ritme lleugerament diferent que les partícules, com passa en el K neutre. Això hauria fet que al cap d'un temps hi hagués un lleuger desequilibri en favor de

la matèria, posem per cas 10.000.001 partícules per 10.000.000 antipartícules. Mentre l'Univers estava prou calent, els parells partícula-antipartícula que en desapareixien per anihilació podien ser reemplaçats pels parells produïts per raigs gamma prou energètics. Ara bé, quan l'Univers es va refredar prou, de manera que els raigs gamma no tenien, en mitjana, una energia suficient per produir els parells de partícula-antipartícula (és a dir, l'energia $2mc^2$), partícules i antipartícules es van anihilar en massa i quedà només una partícula per 20.000.000 de raigs gamma. Cadascun dels electrons i protons que ens componen és el supervivent d'una gran catàstrofe que anihilà més de 10 milions de protons amb 10 milions d'antiprotons (o 10 milions d'electrons amb 10 milions d'antielectrons), el rastre de la qual queda en la radiació fòssil de microones de l'Univers.

1.3.3. *Simetries i classificació de partícules elementals*

El 1960, Gell-Mann proposà el model de quarks per classificar els hadrons. El model estava basat en només tres quarks (u , d i s). A partir de la teoria de grups va procedir a classificar aquestes partícules, agrupades en diverses classes (multiplets), dues de mesons (una família d'una partícula i una de vuit), i els barions (tres famílies: d'una, de vuit i de deu partícules) donades per la teoria de representacions del grup $SU(3)$. Com en qualsevol classificació reeixida, aquest agrupament descobrí la possibilitat de partícules encara no descobertes, amb propietats ben precises, que foren posteriorment descobertes. El 1975 es descobrí el quark c i posteriorment el b i t , i l'esquema s'amplià.

L'èxit de la classificació basada en la teoria de grups ha dut a buscar classificacions més generals, que englobin alhora hadrons i leptons i unifiquin les interaccions electrofebles i les nuclears fortes. Alguns exemples són les teories basades en els grups $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ o $SU(5)$, que prediuen la desintegració del protó, no observada per ara.

1.4. CONCLUSIONS

Cal sintetitzar, ara, algunes idees generals a partir de la informació que hem donat en aquest capítol, en què ens hem proposat

d'esbrinar quins són els elements de la realitat física que romanen constants al llarg del pas del temps, en tres vessants: les lleis de conservació, les constants universals i les simetries.

El primer que crida l'atenció és el caràcter matemàtic d'aquests elements de permanència. Com en el pitagorisme, els nombres semblen indicar alhora la solidesa de la realitat (a través de la constància de les magnituds conservades), la seva contingència (a través de la sensibilitat del contingut de l'Univers a petites variacions en els valors de les constants universals), i el caràcter fructífer de la ruptura d'una excessiva perfecció matemàtica (en les ruptures d'algunes simetries). Es tracta, d'altra banda, d'una visió d'una extrema sobrietat, ja que el rerefons del permanent pot ser reduït a uns pocs nombres que romanen constants.

Hem examinat les magnituds relacionades amb lleis de conservació: la quantitat de moviment, l'energia i la càrrega elèctrica, principalment. Hem subratllat alguns aspectes conceptuals, com les repercussions que tingué la idea de la conservació del moviment en la filosofia i en la teologia, o les repercussions de la conservació de l'energia, magnitud encara més abstracta en la seva definició i multiforme en les seves aparences i que, amb la seva abstracció de nombre i la seva concreció de possibilitats, ha suscitat entusiasmes propers a la mística en els esperits més afins a una forma o altra de panteisme, un univers amb dinamisme propi, sense repòs, sense necessitat d'un déu que hi intervingui contínuament.

En un moment o altre de la vida hem pogut sentir una certa sensació de pau en pensar que, després de la mort, el cos, reduït a pols, tornarà a ser substància primera d'altres objectes o d'altres vides; que la vida i la matèria seguiran malgrat la nostra desaparició. És una sensació propera a la de les reencarnacions, però més difusa: alguns dels nostres àtoms podran ser sorra de desert, fang d'aiguamolls, oxigen en la ventada... Marc Aureli, el segle II dC, ho expressava bellament: «La natura utilitza la substància com una cera per modelar avui un cavall, demà un arbre, demà un home, després moltes altres coses... I cadascun d'aquests éssers només ha subsistit poc temps».

Però en el segle XX, aquesta mena de lligam entre les coses que trobem en la continuïtat de la matèria esdevé més difús: els àtoms ja no són considerats immutables: radioactivitat, desintegracions, ruptures per col·lisió, anihilacions amb antimatèria, posen de manifest la fragilitat de la matèria fonamental, tot i que, de fet, els

àtoms es mantenen en tots els processos químics a què estem acostumats: en la biologia i la geologia, tan sols uns pocs processos manifesten transmutacions atòmiques. Durant el segle XX l'energia ha substituït la matèria com un element més poderós de permanència, i més vast: ens arriba des del Sol, molt més enllà d'on podran arribar els nostres àtoms i és més mudable i universal que la matèria.

Aquestes magnituds conservades, però, tenen una naturalesa global. De fet, poden tenir signes positius i negatius —com les càrregues elèctriques, o el moviment vers la dreta i l'esquerra, o les energies potencials de les forces atractives i repulsives—, de manera que la conservació total és compatible amb una compensació dels valors positius i negatius. Així, podria ser que l'energia, la quantitat de moviment i la càrrega elèctrica total de l'Univers fossin zero. Seria curiós que l'Ésser del món correspongués al nombre que sembla indicar el buit i el no-res!

Pel que fa a les constants físiques, hem subratllat els diversos aspectes del coneixement de la realitat a què ens donen accés: la gravitació, l'electromagnetisme i la llum, el món atòmic i la seva indeterminació fonamental... El més destacat, però, és que l'Univers és molt sensible a modificacions dels valors d'aquestes constants, de manera que petits canvis en algunes d'elles farien que no poguéssim tenir àtoms, ni molècules, ni vida. Això destaca el paper de l'observador en l'Univers: cal que les constants siguin les que són, ja que si no no existiríem. D'altra banda, veiem que un Univers petit no podria tenir vida, ja que no tindria ni tan sols àtoms: l'infinít del cel nocturn és un infinit necessari, no pas un infinit que ens negui.

Finalment, hem vist que l'Univers està regit per grans simetries, que poden ser trencades. A temperatures molt elevades, molt a prop de l'instant inicial, gairebé totes les simetries se satisfien, però es van anar trencant a mesura que l'univers es refredava. Hem comentat alguns d'aquests trencaments de simetries: l'espectacular anihilació global de l'antimatèria amb una quantitat equivalent de matèria, el trencament de simetria entre dreta i esquerra en els neutrinos i les interaccions febles, o el trencament de la simetria entre passat i futur a escala microscòpica. La idea de necessitat de ruptura d'una perfecció matemàtica per tal que hi pugui haver vida resulta força interessant ja que, habitualment, hom ha destacat la perfecció de l'ordre de la natura com un indicatiu de racionalitat transcendent. Sense imperfecció, però, no existiríem.

2. LA BIOLOGIA I LA MEMÒRIA

Molt més propera a l'experiència personal que no pas la conservació de les magnituds físiques és la permanència dels records en el cervell, que formen part de l'autoidentificació més íntima i, alhora, són un recurs per a l'acció i la supervivència, i una font de desigs i projectes. En algunes èpoques, l'ensenyament ha posat molt d'èmfasi en el desenvolupament de la memòria: llibres clàssics com el tractat *De oratore*, de Ciceró, en són un testimoni eloqüent: una bona memòria era un tresor en l'oratòria i la política. La cultura actual li dona força menys importància, potser perquè se sent depassada pel creixement desbordant de la quantitat d'informació i perquè, amb la informàtica, ha ampliat la capacitat d'emmagatzematge i l'agilitat de la recerca d'informacions. De totes maneres, no tenir presents i ben assimilats els coneixements essencials limita molt la creativitat. Plató, en un dels diàlegs, reflectí la malfiança envers l'escriptura (descoberta, segons el mite, pel déu egipci Toth), que faria que els humans disminuïssin l'esforç de memorització personal i, per tant, d'assimilació i apropiació del saber.

Però aquesta memòria, la més immediata a la consciència, no és pas l'única que posem. També tenim, com a individus, una memòria purament física, inconscient però efectiva; no només la memòria neuronal de l'espècie, sinó també la memòria immunitària, que identifica les cèl·lules del nostre cos en oposició a les cèl·lules estranyes, i que emmagatzema el record de les malalties que hem tingut i permet de reaccionar amb més eficàcia a les noves invasions. La genètica ens descobreix en el DNA una altra forma de memòria: la memòria de les espècies, allò que fa, per exemple, que un gos d'ara sigui molt semblant a un gos de fa tres mil anys, i també la infor-

mació bàsica de cadascuna de les nostres cèl·lules, des de la primera de l'embrió fins a la darrera que sobreviurà en la descomposició de l'organisme (i més encara, ja que el DNA perdura, en ocasions, després de la mort de les cèl·lules). La intensa activitat i les immenses perspectives dels estudis sobre el genoma i, d'altra banda, els procediments d'identificació d'individus a partir de la seva empremta genètica, fan especialment actual la consideració d'aquesta forma de memòria.

Dediquem aquest capítol a la presentació d'aquestes tres menes de memòria: neuronal, immunitària i genètica. Cal dir que molt sovint el camp de la paleontologia és presentat com la memòria de la Terra i que, per tant, hauria pogut ser tractat en aquest capítol. Tot i això, hem preferit posposar-lo al capítol quart, en l'apartat dedicat al temps i la geologia. A diferència dels temes tractats en el capítol anterior, els d'aquest susciten debats ètics de gran actualitat als quals dedicarem l'apartat final del capítol.

2.1. LA MEMÒRIA GENÈTICA

Abans de tenir consciència de nosaltres mateixos, abans dels primers records conscients, ja ens identifica, parcialment, el fet de pertànyer a una espècie concreta, la humana, i el fet d'assemblar-nos, més o menys, als nostres pares. Memòria d'espècie, memòria de família, són formes de memòria biològica inevitable. Per això comencem per la genètica aquesta exploració en la memòria.

Què fa que els descendents dels gossos, dels humans i de les palmeres segueixin essent gossos, humans i palmeres respectivament? Què fa que els infants facin pensar, en un aspecte o altre, en algun dels seus progenitors o en algun antecessor menys immediat? Al llarg de la història, fins al segle XX, els mecanismes hereditaris han estat un enigma i han esdevingut, en canvi, un dels focus tècnics i culturals del nostre temps.

2.1.1. *El camí cap als gens*

Abans de reflexionar sobre el paper dels gens en la ciència i la cultura actuals, exposarem breument les fites essencials de la història dels coneixements actuals.

2.2.1.1. Els caràcters hereditaris

Durant segles, els estudis sobre l'herència havien estat relacionats amb el millorament de les espècies vegetals i animals en l'agricultura i la ramaderia, sense rigor científic i limitats a un pragmatisme sense preguntes profundes. Alguns naturalistes del segle XVIII, com Maupertuis i Buffon, proposaren unes teories, anomenades micromeristes, segons les quals els pares transmetien als fills diminutes partícules en les cèl·lules germinals. Els primers estudis sistemàtics sobre l'herència foren duts a terme pel monjo agustí Gregor Mendel, en els jardins del monestir de Brno, entre 1850 i 1860, que aconseguí més de 13.000 híbrids, suficients per donar validesa estadística als seus resultats. Els seus treballs resulten exemplars en diversos aspectes metodològics: la selecció d'un sistema adient (lleguminoses, en especial el pèsol *Pisum sativum*) i d'algunes característiques concretes observables fàcilment: el color (groc o verd) i la rugositat, entre d'altres. El rigor metodològic (fecundació artificial i protecció de les plantes d'una polinització fortuïta), la claredat de les hipòtesis i l'aplicació de mètodes estadístics per a un examen quantitatiu, són altres característiques del seu treball.

Les principals observacions de Mendel poden sintetitzar-se així: 1) La primera generació d'híbrids a partir de dos individus purs en un caràcter (AA i aa) o diversos caràcters (AABB, aabb) és homogènia (tots són Aa o AaBb): tots els fills presenten la característica d'algun dels progenitors (en el cas que un dels caràcters sigui dominant) o bé una mescla de les característiques (si tots dos són dominants o recessius). 2) En la segona generació, la proporció de repartiment d'un caràcter és de 3:1 (corresponents a les combinacions AA, Aa i aA i a la combinació aa, respectivament) i la de dos caràcters independents és de 9:3:3:1 (corresponents a AABB, AABb, AAbB, AaBB, AaBb, aABB, aAbB, aABb; a aaBB, aaBb, aabB; a AAbb, Aabb, aAbb; i a aabb). 3) Quan hi ha diversos caràcters, apareixen totes les combinacions possibles, en les proporcions indicades per les lleis de la combinatòria, cosa que posa de manifest que els caràcters es transmeten independentment els uns dels altres, i que l'individu, doncs, més que una unitat homogènia és un mosaic de caràcters (lleï de segregació independent). Mendel intentà explicar això tot suposant que els individus produeixen cèl·lules embrionàries i políniques diverses, en què els caràcters es combinen de maneres diferents. Aquells primers estudis dugueren

al concepte d'unitats hereditàries indivisibles i fonamentals (o «factores hereditaris»), anomenades *gens* a partir de 1910.

Mendel féu públics els seus resultats el 1865, però passaren desapercebuts en una època en què es publicaven molts treballs sobre hibridacions, estimulats per la publicació de Darwin sobre l'origen de les espècies, per intentar esbrinar com es produïen les espècies. Els resultats de Mendel foren recollits per W. Fockel en un tractat sobre híbrids vegetals, publicat el 1881, que permeté que arribessin a noves generacions de botànics i genetistes. Cap al 1900, l'holandès H. de Vries, l'alemany C. Correns i l'austríac E. von Tschermak redescobriren independentment les lleis de la hibridació vegetal, reconegueren el mèrit de Mendel i ampliaren els seus treballs. La memòria de Mendel, publicada originalment en alemany, fou traduïda al francès i a l'anglès el 1907.

2.1.1.2. Els gens i els cromosomes

També a finals del segle XIX, hom observà unes petites unitats, els cromosomes, en els nuclis de les cèl·lules, tot i que encara es tardà a relacionar-les amb l'herència. A començaments del segle XX, la *genètica* (nom proposat el 1906 per Bateson) esdevingué una ciència desenvolupada, al principi en la botànica (ja hem esmentat els tres botànics «redescobridors» de Mendel) i poc després en zoologia, citologia i embriologia, i es convertí en un camp globalitzador dintre de la biologia. S'observà una correlació entre la dinàmica dels cromosomes (separació en la meiosi, combinació...) i la divergència de formes en algunes espècies, cosa que dugué Sutton (1902) i Boveri (1904) a expressar la hipòtesi de la relació entre els cromosomes i els caràcters mendelians.

A partir de 1906, Thomas H. Morgan i els seus col·laboradors a la Universitat de Columbia (Nova York) començaren a treballar amb la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*, que té quatre parells de cromosomes i que exhibeix unes característiques hereditàries ben definides relacionades, per exemple, amb el color dels ulls o la forma del cap o de les ales. Des d'aleshores, aquesta espècie ha esdevingut un camp d'assaigs privilegiat en l'anàlisi genètica. Morgan i els seus col·laboradors foren els primers a demostrar que els gens estan associats amb els cromosomes. Els primers indicis foren d'una banda la relació entre alguns caràcters hereditaris i els

cromosomes sexuals i, d'altra banda, l'acoblament d'alguns caràcters hereditaris, que semblava una excepció a la llei de segregació independent de Mendel. Així, els experiments van posar de manifest que l'herència d'un alel que produeix ulls blancs en lloc dels ulls vermells habituals d'aquesta mosca està sempre correlacionada amb un cromosoma X i mai amb un cromosoma Y (algunes malalties relacionades amb els cromosomes sexuals en els humans són el daltonisme i l'hemofília, per exemple). Cap al 1922, Morgan i els seus col·legues ja havien aconseguit ordenar alguns centenars de gens sobre els quatre parells de cromosomes de la *D. melanogaster*, i el 1927 van aconseguir les primeres mutacions artificials mitjançant raigs X. A partir del 1933, el descobriment dels cromosomes gegants de les glàndules salivals de les mosques i els progressos dels microscopis permeteren afinar l'observació i revelaren una sèrie de bandes al llarg dels cromosomes, que permeteren localitzar amb més detall els gens. Cap a la dècada dels quaranta, Dobzhansky, Mayr i Simpson proposaren l'anomenada *síntesi evolutiva*, que atribueix a les mutacions i recombinacions ocasionals dels gens les variacions aleatòries necessàries per a l'evolució i impulsaren així la confluència entre la genètica i la teoria de l'evolució.

2.1.1.3. Naturalesa química dels gens

La recerca de la naturalesa química dels gens és un entrellaçament de diverses línies. Cap al 1890 foren descoberts els enzims, és a dir, molècules proteíniques que actuen com a catalitzadors de reaccions bioquímiques. A la primera dècada del segle XX, un metge anglès, A. Garrod, va observar que certes anomalies i desordres metabòlics dels humans seguien les lleis de l'herència, i observà que aquests trastorns estaven relacionats amb l'absència d'algun enzim. Això el dugué a suggerir que els determinants de l'herència controlen la producció d'enzims. Aprofundir en la naturalesa d'aquests determinants genètics no fou possible fins que cap al 1930 hom començà a utilitzar bacteris i virus com a organismes per a l'estudi de l'herència.

Cap al 1940, G. Beadle i E. Tatum generalitzaren les idees de Garrod, tot enunciant el principi d'«un enzim, un gen». Com que els enzims estan compostos per proteïnes, i moltes proteïnes contenen més d'una cadena polipeptídica, la noció evolucionà fins a transformar-se en «un polipèptid, un gen». Des de llavors s'ha de-

mostrat que hi ha molts gens que codifiquen proteïnes que no actuen com a enzims, sinó com a hormones o com a proteïnes estructurals. Cap al 1945, Tatum i Lederberg començaren a utilitzar l'*Escherichia coli*, un bacteri intestinal comú, per a examinar la relació entre gens i funcions cel·lulars, i impulsaren la genètica bacteriana. En aquests organismes es reconegué definitivament que el DNA (àcid desoxiribonucleic) i el RNA (àcid ribonucleic) tenen un paper determinant en la genètica.

El DNA (àcid desoxiribonucleic) fou descobert el 1869 per F. Miescher, que observà que era un producte orgànic diferent de les proteïnes, anomenat inicialment *nucleïna* o *àcid nucleínic*. Entre 1879 i 1903, A. Kossel aconseguí aïllar i identificar les bases púriques (guanina i adenina) i pirimidíniques (timina i citosina) que el componen, juntament amb sucres fosforilats (desoxiribosa fosfat) als quals estan unides. La transmissió de la informació genètica es fa a través del DNA. Els resultats d'O. Avery, i d'A. Hershey i M. Chase suggerien, el 1944, que el DNA és el portador de la informació genètica, cosa que va enfocar en aquesta molècula molta atenció.

2.1.1.4. Estructura del DNA i funcionament dels gens

El 1953, James Watson i Francis Crick troben, a partir de dades de difracció de raigs X, l'estructura en doble hèlix del DNA. Es tracta d'un dels casos en què l'estructura (molt elegant, d'altra banda, i que resultà immediatament molt suggerent per a alguns artistes, especialment per a Salvador Dalí, que la representà en diverses obres) està més directament vinculada a la funció. En efecte, cadascuna de les hèlixs està formada per una cadena de bases (adenina, timina, guanina, citosina) que complementa la cadena de bases de l'altra hèlix, segons la regla que l'adenina d'una cadena sempre està relacionada amb la timina de l'altra (i recíprocament) i que la guanina de l'una sempre està relacionada amb la citosina de l'altra (i recíprocament). Això suggeria immediatament un mecanisme de duplicació de la informació. Si se separen les dues hèlixs, cadascuna d'elles pot formar, amb l'ajut d'uns certs enzims, una cadena complementària, tot combinant les bases de manera adequada segons el principi de combinació al·ludit.

De fet, s'ha comprovat posteriorment que no hi ha una sola estructura en doble hèlix sinó que, segons les condicions ambientals, el DNA pot adoptar diverses estructures en doble hèlix (per exem-

ple, hèlixs dextrògires o levògires, i amb diferents valors geomètriques del radi i el pas de rosca). El DNA de les cèl·lules eucariotes està empaquetat de manera molt compacta en la cromatina, en què s'enrotlla al voltant de proteïnes bàsiques, les histones, formant nucleosomes que, per la seva banda, formen una altra estructura espiral al llarg del cromosoma.

A partir del 1953, les descobertes relacionades amb la biologia molecular se succeeixen vertiginosament. El 1956, és descobert el RNA de transferència (molècula que combina tres bases amb un aminoàcid en el ribosoma, lloc on es fabriquen les proteïnes); el 1957, la DNA-polimerasa (Kornberg), enzim que intervé en la duplicació del DNA; el 1960, el RNA missatger (molècula a la qual és transferida la informació d'un gen del DNA i que la porta als ribosomes de l'exterior del nucli, on serà fabricada la proteïna corresponent); el 1961, alguns mecanismes de control de lectura de gens (Jacob i Monod), que són els que fan que unes cèl·lules llegeixin alguns dels gens del DNA i d'altres cèl·lules, en canvi, en llegeixin d'altres, tot explicant així la diversitat de formes cel·lulars de l'organisme. Així, cada gen és un fragment de DNA que conté informació sobre els aminoàcids, però també sobre el RNA missatger i el de transferència i una part que en regula la lectura.

2.1.2. *Formes de permanència*

En aquesta secció considerarem quatre formes de permanència: el codi genètic, els gens, les espècies i els individus.

2.1.2.1. El codi genètic

Un cop acceptat que els gens contenen informació sobre els aminoàcids, cal veure com es relaciona la informació de les bases amb els aminoàcids. Com que hi ha vint aminoàcids i només quatre bases, cal tres bases per especificar un aminoàcid. En efecte, les combinacions possibles de dues bases són $4^2 = 16$, i per tant només podrien especificar 16 aminoàcids. En canvi, hi ha $4^3 = 64$ combinacions de tres bases (anomenades *codons*), que poden especificar, amb redundàncies, la vintena d'aminoàcids.

El 1961, Nirenberg i Matthaei determinen que la combinació

TTT codifica la fenilalanina. Des d'aquell moment, i fins al 1966, se succeeixen les identificacions. El 1966 es culmina el desxiframent del codi genètic, segons el qual cada tres bases successives d'un gen del DNA (codons) determinen un aminoàcid de la proteïna que codifica, i que sintetitzem en la taula 3. De fet, de les 64 combinacions possibles, n'hi ha 61 que codifiquen aminoàcids. Les tres combinacions restants (TAA, TAG i TGA) que inicialment es pensà que no tenien sentit, foren associades posteriorment amb la instrucció «final de lectura». El senyal de l'inici de lectura és el triplet ATG, que també codifica l'aminoàcid metionina que serà, doncs, el primer aminoàcid de qualsevol cadena polipeptídica.

El codi genètic és universal, des dels bacteris als animals superiors, tret d'alguns detalls per al DNA mitocondrial, excepció deguda al fet que els mitocondris —petits corpuscles que es troben a l'interior de la cèl·lula i que tenen com a missió principal la producció d'ATP, la moneda de canvi d'energia metabòlica— foren probablement organismes independents en èpoques molt antigues, i que haurien entrat en simbiosi amb altres menes de cèl·lules per donar-ne de més sofisticades i amb més disponibilitat energètica. Els mitocondris conserven el seu DNA propi i segueixen reproduint-se tot seguint un codi genètic lleugerament diferent, i que potser és una reminiscència d'un codi genètic més primitiu que l'usual.

El codi genètic representa la permanència d'un codi universal, el factor més profundament general de la vida que coneixem actualment. No sabem encara com es va originar, tot i que n'hi ha diverses teories. El més impressionant és, però, que durant més de 3.600 milions d'anys, i per a totes les espècies de microorganismes, d'animals, de plantes, aquest codi ha estat el transmissor d'informació d'uns éssers als altres. És, doncs, l'element més permanent sota els canvis i la diversitat de la naturalesa vivent.

Per tal de comprendre la complexitat del text, cal tenir present que els gens no són blocs continus dintre del DNA, sinó que estan constituïts per fragments interromputs per llargues seqüències sense sentit conegut (introns). En l'analogia textual, seria com si un text amb sentit estigués interromput per moltes pàgines de lletres sense cap sentit. D'altra banda, en els mamífers, gairebé només el cinc per cent de bases del DNA pertanyen a algun gen, mentre que el noranta-cinc per cent restant sembla no tenir cap sentit, si més no que hagi pogut ser reconegut fins ara. Això és un contrast notable amb els microorganismes, on gairebé tot el DNA està relacio-

TAULA 3. El codi genètic.

<i>Aminoàcids</i>	<i>Codons</i>
Alanina	GCA, GCG, GCT, GCC
Arginina	AGA, AGG, CGA, CGG, CGT, CGC
Asparagina	GAT, GAC
Aspartat	AAT, AAC
Cisteïna	TGT, TGC
Glutamina	GAA, GAG
Glutamat	CAA, CAG
Glicina	GGA, GGG, GGT, GGC
Histidina	CAT, CAC
Isoleucina	ATA, ATT, ATC
Leucina	TTA, TTG, CTA, CTG, CTT, CTC
Lisina	AAA, AAG
Metionina	ATG
Fenilalanina	TTT, TTC
Prolina	CCA, CCG, CCT, CCC
Serina	AGT, AGC, TCA, TCG, TCT, TCC
Treonina	ACA, ACG, ACT, ACC
Triptòfan	TGG
Tirosina	TAT, TAC
Valina	GTA, GTG, GTT, GTC

nat amb la codificació de proteïnes. La proporció de DNA no codificant augmenta a mesura que els individus són més evolucionats.

Un altre factor de complexitat és que la informació genètica només dóna la llista d'aminoàcids, però no especifica l'estructura espacial de les proteïnes. Aquestes, però, han d'adoptar formes molt concretes per tal de poder actuar biològicament, de manera que la seva estructura té un paper crucial en la seva eficàcia biològica. El problema del plegament correcte de les proteïnes és, però, molt considerable. En efecte, si la cadena d'aminoàcids provés a l'atzar formes diverses fins a arribar a la d'energia lliure més petita, i si tardés una mil·lèsima de segon en cada provatura, tardaria milers de milions d'anys a arribar a la forma correcta; en canvi, el procés de plegament es fa en pocs segons.

2.1.2.2. Els gens

Un altre element de permanència en la informació biològica el representen els diversos gens, fragments petits de DNA que codifi-

quen una proteïna concreta, i que experimenten poques mutacions en molts individus. Per exemple, el gen de l'hemoglobina és idèntic en la majoria dels humans, llevat d'alguns canvis sovint relacionats amb malalties, i és força semblant al gen de l'hemoglobina en altres primats, del qual se'n separen unes poques bases —menys d'un u per cent. Alguns dels gens es fan especialment remarcables per les seves conseqüències en malalties hereditàries que es transmeten de generació en generació, com la corea de Huntington o l'hemofília, entre moltíssimes altres.

El gen representa un tipus de permanència menys universal que el codi genètic, però més dilatada que la del DNA individual i fins i tot que el DNA de les espècies, ja que diverses espècies poden tenir en comú alguns gens. De fet, gairebé un quaranta per cent dels gens relacionats amb malalties genètiques humanes tenen homòlegs en alguns microorganismes, concretament en els llevats. La situació té certes analogies amb l'etimologia del llenguatge: cal buscar l'origen dels nostres gens en gens d'espècies anteriors, i en podem seguir el rastre, amb lleugeres modificacions, al llarg de milions d'anys. La comparació de gens anàlegs de diverses espècies obre un nou camp a la biologia comparada i noves perspectives de comprensió. Si fem determinades hipòtesis sobre el ritme de mutacions, que depèn del tipus de gen, aquest estudi comparatiu ens subministra una mena de rellotge per a estudiar la cronologia de l'evolució.

Per a alguns autors, els gens serien biològicament més rellevants que els individus concrets, els quals serien solament transmissors de gens d'una generació a l'altra, assegurant-ne així la perpetuació. Ara bé, pensar en gens aïllats resultaria enganyós i simplista. Un mateix gen pot ser actiu en unes espècies i pot romandre inactiu en d'altres, ja que la seva lectura depèn de mecanismes de regulació. En segon lloc, cal tenir en compte que els gens no actuen aïlladament, sinó que molt sovint funcionen en grups, de manera conjunta.

La relació entre els gens i la història ha estat també aplicada a l'estudi de les grans migracions humanes. La idea es basa en estudiar la variabilitat d'uns determinats gens, habitualment corresponents al DNA mitocondrial en una població humana. Com més gran és la variabilitat i més gran és l'antiguitat d'aquella població, més temps hi ha hagut que aquella població es vagi creuant amb altres poblacions. Aquestes tècniques, iniciades per Cavalli-Sforza —premi Catalunya de 1994— i per altres col·laboradors, entre els quals, a Barcelona, Jau-

me Bertranpetit, han permès estudiar les grans migracions del Neolític, complementant així els estudis prehistòrics clàssics.

2.1.2.3. Les espècies

Les espècies constitueixen, des del punt de vista genètic, una mena de memòria més concreta que el codi genètic o que un gen determinat.

Linné va inventar la classificació més reeixida d'animals i plantes. En les diverses edicions de *Systema Naturae* (1735, primera edició, 1759, desena edició, cada vegada més ampliades) classifica animals i plantes a partir de criteris morfològics, distingeix una jerarquia d'ordenació (classe, família, ordre, gènere, espècie) i proposa una nomenclatura binominal llatina que indica gènere i espècie. Linné, però, només pretèn classificar sense atribuir profunditat temporal ni dinamisme a aquesta classificació, que posteriorment s'interpretarà en un sentit dinàmic. Diem que individus pertanyen a espècies diferents quan, en les condicions naturals, no intercanvien gens, o, en particular, quan llurs acoblaments no són fecunds.

Tot i que el llibre cabdal de Darwin es titulava *L'origen de les espècies*, aquesta qüestió és un dels temes encara força discutits en la teoria de l'evolució. Darwin suposava que les espècies es diferenciaven quan es produïa una separació geogràfica que impedia el contacte entre els individus d'una mateixa espècie. Els àmbits diferents i les mutacions diferents a què es veien sotmesos feien que la separació biològica entre les dues poblacions anés augmentant fins que els seus individus ja no es podien creuar de manera fèrtil. A la pràctica, però, també es pot donar especiació sense separació geogràfica, de manera que els individus deixarien de creuar-se per algun altre motiu. Per exemple, com a conseqüència d'intentar aprofitar al màxim els recursos d'un territori, uns individus s'especialitzarien en uns nutrients, d'altres individus en d'altres, i malgrat coexistir territorialment els comportaments diferents els anirien separant. D'altra banda, també resulta sorprenent la llarguíssima durada d'algunes espècies que no semblen veure's afectades per mutacions durant milions d'anys.

Des de 1970, els mètodes de seqüenciació de bases ideats per F. Sanger —que obtingué per aquest treball el seu segon Premi Nobel

de Medicina i Fisiologia, després d'un primer premi pel desenvolupament de mètodes d'identificació de la successió d'aminoàcids de les proteïnes— han pogut ser automatitzats i els estudis de seqüències de bases d'alguns gens han esdevingut un mètode molt útil en classificació d'espècies. Més encara: la comparació entre les seqüències dels gens d'una mateixa proteïna permeten establir, amb certes hipòtesis, una cronologia de l'aparició de les espècies, que complementa amb força més detall les cronologies estratigràfiques de la paleontologia clàssica. De passada, això permet arribar a semblances que no poden ser advertides a simple vista: per exemple, la diferència entre diversos gens dels micos i els seus corresponents en els humans és més petit que un u per cent —atès que tenim aproximadament uns cent mil gens, la diferència absoluta no és petita. De totes maneres, resulta sorprenent que una diferència genètica relativa tan petita pugui dur en la realitat a possibilitats vitals tan diferents.

Subratllarem, ara, dues novetats recents pel que fa al genoma de les espècies: el trencament de fronteres permès per l'enginyeria genètica i la seqüenciació completa.

a) Enginyeria genètica: trencar fronteres

Les tècniques d'enginyeria genètica, consistents a introduir en el genoma d'una espècie gens d'una altra, començaren a ser aplicades el 1971 per S. Cohen i H. Boyer. Aquestes tècniques permeten introduir en bacteris el gen d'una determinada proteïna, que aquests aniran fabricant com si formés part del seu propi genoma. Això ha permès revolucionar els mètodes de producció de substàncies com la insulina o l'hormona de creixement humà, de gran interès mèdic. Aquestes possibilitats no s'han limitat a organismes unicel·lulars, sinó que també s'han aconseguit introduir gens aliens en animals i en plantes, produint així espècies transgèniques; també han permès obtenir animals transgènics, que poden resultar molt útils per als estudis mèdics. Així, per exemple, és possible inserir en el genoma d'un ratolí gens relacionats amb malalties, com ara la diabetis, cosa que obre moltes possibilitats per al coneixement de les malalties genètiques. Algunes d'aquestes espècies genètiques poden tenir molt d'interès en agricultura i ramaderia. Per exemple, hom ha aconseguit llavors molt més resistents a certes plagues, o amb més rendiment alimentari. Tractarem després els debats a l'entorn d'aquestes temes.

b) Seqüenciació de tot el genoma

Els estudis que hem esmentat es basen en l'intercanvi d'un o de pocs gens. La possibilitat de modificar gens i l'afany de comprendre les relacions entre els gens i el desenvolupament i funcionament dels organismes han convertit la seqüenciació i interpretació del genoma complet de les diverses espècies en un dels objectius de la ciència moderna. El 1996 s'assolia per primera vegada la seqüenciació completa d'un organisme unicel·lular (el llevat *Saccharomyces cerevisiae*, d'uns 6.000 gens), i el 1998 la d'un individu multicel·lular, el cuc *Caenorhabditis elegans*, d'uns 19.000 gens —la funció de 12.000 dels quals és encara desconeguda— i compost per 959 cèl·lules, totes elles conegudes amb detall. L'any 2000, la de la mosca *Drosophila melanogaster*, d'uns 25.000 gens, i fou anunciada la seqüenciació del genoma humà.

El coneixement del genoma humà, és a dir, del conjunt entre 50.000 i 100.000 gens de què disposem els humans, en uns tres mil milions de parells de bases, és una de les empreses científiques de més abast de la dècada dels noranta i del segle XXI, en una col·laboració internacional de molts laboratoris públics, en competència, en ocasions, amb laboratoris i empreses privades, treballs que suposen inversions del voltant de 2.500 milions de dòlars anuals, amb forta tendència a créixer. Les primeres idees sobre aquest projecte sorgiren a finals dels setanta. El 1983 s'aconseguí identificar per primer cop un gen relacionat amb una malaltia hereditària, la corea de Huntington; el 1987 fou identificat el gen de la distròfia muscular i el 1989, el de la fibrosi quística. Des d'aleshores, la identificació de gens relacionats amb malalties hereditàries ha progressat veloçment. També ha progressat, encara més ràpidament, la seqüenciació del DNA humà: el 1999, hi ha la seqüenciació completa del cromosoma 22, l'abril de 2000, la del cromosoma 21; el 26 de juny de 2000, s'anuncia per primera vegada una seqüenciació completa, però de no gaire valor, ja que encara no s'hi han identificat amb detall els gens. Cal recordar, a més, que el 95 % percent del DNA dels humans, i dels mamífers en general, no codifica informació i no se'n coneix la utilitat. Dels milers de gens que constitueixen el genoma humà, el 99,9 % són comuns a tota l'espècie humana, i només una petita part manifesta la variabilitat individual. És, però, en aquesta variabilitat on es concentra l'interès mèdic.

2.1.2.4. Individus

Hem indicat que el tant per cent de gens on es manifesten diferències individuals és relativament petit. Tot i això, en l'actualitat, les tècniques genètiques estan constituint, cada vegada més, bases per a la identificació d'individus a partir d'un sol cabell, o d'una gota de sang, d'una sola cèl·lula o per a estudis sobre paternitat, en cas de dubtes. En efecte, cadascuna de les cèl·lules d'un individu està marcada pel seu DNA individual (tret dels glòbuls vermells, que no en tenen). Ara bé, malgrat això, és diferent una cèl·lula del fetge que una neurona, i un cabell és diferent d'una dent. L'explicació d'aquesta diferència rau en què les cèl·lules no llegeixen tot el DNA, sinó parts diferents, de manera que en realitzen potencialitats diferents. Investigar els processos de morfogènesi, és a dir, com es relaciona la lectura de les diverses parts del DNA amb la formació dels diferents òrgans, és una tema científic apassionant.

La molècula de DNA es transmet sense canvi —tret de les mutacions degudes a errors fortuits— en organismes que es dupliquen. En canvi, en els organismes amb reproducció sexual, cada individu té un DNA diferent, característic, que combina la informació genètica del pare i de la mare. Ara bé, la conservació del DNA al llarg del temps no és pas un fenomen estàtic. En la reduplicació del DNA hi ha, a més de les recombinacions, moltes possibilitats d'errors. Tot i això, hi ha unes molècules especialitzades en la detecció i reparació d'errors, que van recorrent contínuament el DNA en la seva tasca de comprovació de la qualitat de les còpies. Alguns d'aquests sistemes poden ser inhibits sota condicions d'estrès; en microorganismes, això augmentaria el ritme de mutacions expressables fenotípicament i acceleraria l'adaptació al medi, tot augmentant les capacitats d'adaptació i contribuint a fer perdurar l'espècie; en els humans, la inhibició del sistema corrector acostuma a provocar càncer.

Una de les qüestions més noves en aquest camp és la clonació d'individus, és a dir, aconseguir individus genèticament idèntics a un individu determinat. Per a això, cal treure el nucli d'una cèl·lula somàtica (és a dir, amb tota la dotació de cromosomes) i introduir-lo en un òvul, després d'haver tret el nucli d'aquest (que només té la meitat de dotació cromosòmica). El 1996 es va aconseguir clonar una ovella, cosa que va disparar els debats sobre les possibles aplicacions i conseqüències de la clonació d'individus, de les quals parlarem al final.

2.1.3. Aspectes conceptuals

Fem aquí unes primeres consideracions centrades en la permanència, i tornarem, en les conclusions generals, a examinar amb més detall els nombrosos debats a l'entorn de les modificacions genètiques.

Hem trobat en la genètica quatre elements de permanència, a diferents escales temporals: un llenguatge (codi genètic) comú a tota la vida des dels seus orígens; unes paraules (gens) que poden ser comunes, amb poques variacions en moltes espècies; uns llibres (espècies) que són comuns, amb petites variacions, per a molts individus; i uns exemplars (individus) en què el DNA representa la permanència en totes les cèl·lules de l'individu al llarg de la seva vida.

Els humans som especialment sensibles a aquesta pertinença a una espècie, que contribueix, de vegades, a una certa consciència de perdurabilitat. Artistes, escriptors, polítics i militars són especialment sensibles al rastre que deixaran en la memòria dels seus compatriotes o, segons quin sigui el grau d'ambició o de deliri, en els humans. Es tracta, naturalment, d'una memòria històrica, emmagatzemada en llibres i reviscuda en cervells, i no en gens, i per això no en parlem aquí.

Hem destacat les interaccions entre naturalesa i tècnica, amb la seqüenciació del genoma i l'enginyeria genètica: l'estudi del genoma possibilitaria el tractament de malalties genètiques i el desenvolupament de la farmacogenòmica, cosa que explica els interessos econòmics multimilionaris de les empreses que hi participen, i que porten a les possibilitats de patentar la informació sobre gens.

2.2. LA MEMÒRIA NEURONAL: EL CERVELL

La memòria per excel·lència és la memòria neuronal, és a dir, la conservació més o menys conscient dels records en el cervell: és la més vívida, la més íntima, aquella on podem tornar per reviure escenes o sentiments i que ens identifica com a individus amb vida interna pròpia. Cal tenir en compte, però, que la memòria és molt més vasta que la consciència, i pot modificar des del subconscient la nostra conducta, com ja ho advertí Freud. La memòria és una facultat complexa, que pot ser desglossada en diversos aspectes. Una

classificació segons la perdurabilitat és la memòria a llarg i a curt termini; la primera, la dels records del que vam fer ahir o de les anècdotes viscudes al llarg de la vida, correspon a canvis persistents en el sistema nerviós. La memòria a curt termini —fixar durant uns minuts un número de telèfon, per exemple— no implica canvis durables en les sinapsis, sinó l'excitació relativa i efímera d'algunes neurones. Altres classificacions de la memòria són més detallades, i arriben a especificar-ne cinc tipus: procedimental (per exemple, caminar), semàntica (el llenguatge), de representació perceptiva, de treball i episòdica, les dues darreres corresponen a la memòria a curt termini.

Hi ha hagut nombroses metàfores sobre la memòria. En l'antiguitat es parlà de la memòria com una tauleta de cera, en la qual s'anaven inscrivint els esdeveniments, i de la memòria com a colomar, metàfora que volia subratllar, en contrast amb el caràcter ordenat i estable de la tauleta de cera, el desordre i la capacitat d'intrusió involuntària que tenen els records. En l'actualitat, la metàfora per excel·lència de la memòria és l'ordinador, i és a ella que ens referirem en aquesta secció.

No sempre el paper del cervell com a centre de la memòria ha estat prou clar. Històricament, hi hagué una pugna entre els partidaris del cervell i els del cor com a centres de la vida conscient. L'acceleració del cor en els ensurts i les passions, i la seva vulnerabilitat, en oposició a l'aparença blanquinosa i poc sensible del cervell, feia que hom li atribuís el centre de la vida. Demòcrit situà àtoms psíquics en el cervell, i Plató hi situà l'ànima intel·lectiva immortal (en oposició a les ànimes concupiscent i irascible), però Aristòtil el considerà com una glàndula destinada a la refrigeració del cos. La medicina hipocràtica va reconèixer al cervell un paper primordial en el pensament i la memòria. Sant Agustí, en el segle IV dC, fou un dels primers autors a atribuir funcions a diferents zones del cervell: atribuï la imaginació a la part anterior, la raó a la mitjana, i la memòria a la posterior, en una mena d'intuïció precursora dels afanyes de localització cerebral de facultats psíquiques que tanta importància adquiriren els segles XIX i XX. El cervell està constituït per una zona interior de substància blanca i una zona exterior de matèria grisa. Cap al segle XVI, hom atribuïa a la part interior les activitats relacionades amb el pensament i la memòria i es tardà un parell de segles a situar aquestes activitats en l'escorça grisa.

2.2.1. *Els elements bàsics*

2.2.1.1. Les neurones

La memòria no s'emmagatzema en una cèl·lula o una sinapsi concreta, sinó en el conjunt de cèl·lules i sinapsis. La primera observació de neurones com a cèl·lules diferenciades —i, per tant, el naixement de la neurofisiologia moderna— es deu a Santiago Ramón y Cajal, durant la seva estada a Barcelona, de 1888 a 1892. És l'època, com ho evoca en les seves memòries, en què troba els mètodes de tinció i els teixits adients, i assoleix les primeres corroboracions de les seves teories. Des de Barcelona parteix al congrés de Berlín de 1889, on assoleix el reconeixement internacional. Imaginar la simultaneïtat a Barcelona de les figures de Gaudí i de Ramón y Cajal —gran dibuixant a més de gran científic, de manera que els dibuixos que féu de les seves observacions microscòpiques encara són reproduïts en molts textos actuals— produeix una sensació especial: quin deversall d'observació de formes de la natura en tots dos casos, les petxines, els arbres, els óssos, els coralls que inspiraren Gaudí, els teixits que inspiraren Ramón y Cajal! Dissortadament per a nosaltres, si algunes ciutats mantenen l'evocació de les grans figures científiques, literàries i polítiques que hi han fet estada, sembla que Barcelona hi sigui indiferent.

Ramon y Cajal havia proposat per al sistema nerviós un model de cèl·lules discretes (neurones) en contra del model proposat per Golgi, que creia que el nervi eren conductes continus com el sistema vascular. Tots dos autors compartiren el premi Nobel de Medicina i Fisiologia de 1906, quan Ramón y Cajal ja havia creat una important escola a Madrid.

De l'observació de les neurones als detalls del funcionament dels nervis, però, hi ha un llarg camí. Cap al 1890, Helmholtz, a Berlín, ja havia mesurat els potencials corresponents al corrent nerviós i la velocitat de propagació dels impulsos al llarg dels nervis. Calia, però, comprendre els mecanismes microscòpics responsables d'aquest potencial i de la seva propagació. En això, tingué un paper essencial l'observació de les diferències de potencial interior i exterior de l'àxon gegant de calamar, que té un radi d'uns 2 mm i que, per tant, es presta a la inserció de microelèctrodes. En la dècada dels quaranta es feren nombrosos experiments, que van ser interpretats qualitativament i sintetitzats quantitativament en un

conjunt d'equacions formulades el 1952 per A. L. Hodgkin i A. F. Huxley i que a partir de certes hipòtesis sobre la dinàmica dels canals de sodi i de potassi són capaces de descriure la forma del potencial d'acció en funció del temps i la seva velocitat de propagació.

Descriurem breument aquest fenomen. En primer lloc, cal que ens fixem en l'estat de repòs de la cèl·lula: el potencial interior és uns 70 mV més baix que l'exterior. A més, la concentració interior de sodi (uns 15 mols/m³) és molt més baixa que a l'exterior (uns 145 mols/m³), mentre que la concentració de potassi a l'interior (uns 155 mols/m³) és molt més elevada que a l'exterior (uns 5 mols/m³). En repòs, el sodi va entrant i el potassi va sortint, a través d'uns canals especialitzats, però aquests fluxos són contrarestats per unes bombes de sodi i de potassi, que, a expenses de l'energia alliberada per l'ATP, expulsen el sodi que ha entrat i absorbeixen el potassi que ha sortit. Per això, l'estat de repòs de la cèl·lula no és una situació d'equilibri, sinó que és semblant a una barca que tingués una via d'aigua, però que es mantingués surant gràcies a una bomba que expulsés l'aigua que va entrant, i que consumís energia per fer funcionar la bomba.

Quan una cèl·lula és pertorbada hi ha dues respostes possibles. Si la pertorbació està per sota d'un cert llindar, la cèl·lula recupera el seu estat inicial ràpidament. En canvi, si la pertorbació supera un cert llindar hi ha grans canvis, el conjunt dels quals és anomenat *potencial d'acció*: el potencial interior augmenta ràpidament, fins a uns +40 mV, i després decreix ràpidament fins a uns -90 mV, per recuperar lentament, després, el valor de repòs de -70 mV. La diferència entre els dos casos és que, en el primer, els canals de sodi romanen tancats, mentre que, per sobre del potencial llindar, s'obren bruscament.

Així, la primera pujada de potencial és deguda al fet que, oberts els canals de sodi, aquest (en forma d'ions positius) tendeix a entrar ràpidament. En arribar a un cert valor del potencial es tanquen els canals de sodi i s'obren els de potassi, el qual tendeix a sortir ràpidament de la cèl·lula (ara carregada positivament) de manera que l'interior d'aquesta es torna cada vegada més negatiu. Finalment, tancats tots els canals, les bombes corresponents tornen el sistema al seu estat inicial, tot expulsant el sodi i recuperant el potassi. El conjunt del procés dura entre 3 i 6 mil·lisegons. Aquesta pertorbació es transmet al llarg de l'axó, amb una velocitat entre 10 i 100 metres per segon.

2.2.1.2. Les sinapsis

Les sinapsis són les connexions entre neurones, o bé entre neurones i músculs. Aquí ens centrarem en les sinapsis entre neurones, que són les que intervenen en els nervis i en el cervell. Quan arriba un potencial d'acció a les sinapsis, situades al final de l'àxon o de les seves ramificacions, s'obren uns canals de calci, entra calci a la cèl·lula, i aquest fa que s'alliberin a l'espai de la sinapsi molècules d'un neurotransmissor que va fins a la neurona postsinàptica, la membrana de la qual té uns neuroreceptors especialitzats. Hi ha neurotransmissors molt diversos: alguns obren canals i d'altres en tanquen; quan l'efecte net de l'acció sinàptica és l'entrada d'ions positius a la cèl·lula postsinàptica (és a dir, un augment del seu potencial intracel·lular) es tracta d'una sinapsi activadora, és a dir, que afavoreix que la neurona postsinàptica es dispari. Si és al revés, la sinapsi és inhibidora, ja que dificulta que la cèl·lula postsinàptica es dispari.

Així, la neurona rep els senyals de moltes cèl·lules presinàptiques a través de les nombroses sinapsis que hi ha en les seves dendrites. El conjunt dels senyals (positius si les sinapsis són activadores i negatius si són inhibidores) se suma. Si el total sobrepassa el llindar d'excitació, la neurona es dispara, és a dir, envia un potencial d'acció. Si no, la neurona roman en repòs.

2.2.2. Els mecanismes de la memòria

2.2.2.1. Memòria a llarg termini

Per explorar la memòria, cal passar de la neurona individual o del parell de neurones interconnectades, a una xarxa de moltes neurones. La memòria es troba al còrtex i implica un gran nombre de neurones i de sinapsis. El còrtex conté entre 10.000 milions i 100.000 milions de neurones, amb una mitjana d'un miler de connexions per neurona. El límit de la memòria d'aprenentatge se situa en uns 10^9 o 10^{10} bits, i no està determinat completament pels gens.

Hi ha dues menes de memòria: la sensoriomotora i la intel·lectual. La segona es troba en el còrtex frontal i és peculiar dels humans o d'animals molt evolucionats. La primera s'emmagatzema en el còrtex, la part relacionada amb la vista o l'oïda. Diversos ex-

periments consistents a treure una part de la substància grisa del cervell de ratolins indicaren que aquesta eliminació parcial no afectava completament la memòria, de manera que aquesta està bastant repartida. S'ha passat, doncs, d'una neuropsicologia que localitzava tipus de memòria en diferents estructures cerebrals a una consideració de la memòria com a capacitat més global.

Les teories modernes sobre memòria a llarg termini provenen del neurofisiòleg canadenc Donald Hebb (1949), que postulà una modificació de les sinapsis quan la neurona postsinàptica és estimulada repetidament quan està prèviament excitada, de manera que dues cèl·lules o sistemes que reiteradament es mostrin actius al mateix temps tendiran a convertir-se en «associats», de manera que l'activitat de l'un facilita la de l'altre. Aquestes modificacions poden produir-se en la cèl·lula presinàptica (en forma d'un increment del nombre de neurotransmissors emesos) o en la cèl·lula postsinàptica (com un increment en el nombre de neuroreceptors) i fan que les sinapsis puguin tornar-se més activadores o més inhibidores. El conjunt d'intensitats de les sinapsis és el que determina el conjunt de memòries emmagatzemades en la xarxa neuronal.

Els mecanismes pels quals es modifiquen les sinapsis no són gaire coneguts. Una de les possibles maneres que tindria la cèl·lula presinàptica de detectar si la cèl·lula postsinàptica està activada seria la presència de dos tipus de canals de sodi diferents en la part postsinàptica, anomenats respectivament *AMPA* i *NMDA*; el primer té una resposta de temps molt curt (uns 3 ms), mentre que el segon té una resposta més llarga (d'uns 20 ms). El primer funciona d'acord amb la llei d'Ohm per al pas del corrent, mentre que el segon té un comportament molt no lineal, de manera que si el potencial a què està sotmès és molt negatiu (perquè la cèl·lula no està activada) no deixa passar corrent, és a dir, roman tancat. Per això, la resposta de la cèl·lula postsinàptica a la recepció de neurotransmissors seria diferent si està o no està activada. Una de les maneres de reforçar la sinapsi seria que aquesta asimetria activada-desactivada modifiqués el comportament de la cèl·lula postsinàptica. Una altra manera seria que la cèl·lula postsinàptica emetés alguna substància vers la cèl·lula presinàptica que produís modificacions en aquesta. Un dels missatgers de retroacció implicats en aquest fenomen podria ser, segons que es creu, el NO (òxid nítric). Els diferents models de memòria i d'aprenentatge són sotmesos a prova en organismes senzills, com el cargol de mar *Aplisia*. A través de processos

associatius, les cèl·lules s'interconnecten en unitats funcionals de memòria. Cada nova percepció afegeix connexions a una xarxa preexistent i la connectivitat s'estèn.

En l'escorça, les xarxes de neurones es desenvolupen des de les zones inferiors sensorials i motores a les àrees de més associació, de manera jeràrquica. Els models neuronals actuals formen xarxes multisensorials i motores complexes, que duen a activitats associatives molt elaborades corresponents a diversos tipus o nivells de memòria: filètica (d'espècie), polisensorial, declarativa (episòdica i semàntica), i conceptual, cada cop menys localitzada. Per exemple, en parlar de soroll de tramvia a Munic, els diferents nivells de memòria podrien ser identificats com: soroll (sensorial), Munic (episòdica), paraula *tramvia* (semàntica), transport públic (conceptual). La memòria motora, com la sensorial, també està jerarquitzada: filètica, actes, programes, plans, conceptes. La memòria de l'espècie es refereix a actes reflexos, i ja actua en la medul·la, el troncencèfal i el cerebel, sobre el qual hi ha els nuclis del tàlem, ganglis basals i hipotàlem.

L'aprenentatge modifica les intensitats relatives de les sinapsis, i és un procés complex. L'hipocamp té un paper crític en la formació de xarxes de memòria en l'escorça associativa; quan es lesiona, es produeixen amnèsies anterògrades, en les quals no es pot adquirir ni desenvolupar noves memòries, tot i que es conserven les antigues. Les connexions recíproques entre l'hipocamp i les àrees neocorticals permeten convertir memòria a curt termini en memòria a llarg termini. L'amígdala, també en el lòbul temporal, intervé en la formació i consolidació de la memòria i té un paper en el seu significat afectiu i emocional. L'aprenentatge d'accions exigeix, al principi, molta atenció, que es manifesta en una excitació de la part prefrontal; de mica en mica, a mesura que es va assimilant l'aprenentatge, i es va produint una habituació, se'n van ocupant jerarquies inferiors com el cerebel i els ganglis basals (ex.: conduir un cotxe, tocar el piano).

2.2.2.2. Xarxes neuronals i computació

La relació entre ordinadors i cervell és molt activa, des d'un doble vessant: investigar com funciona el cervell ajudaria a fer ordinadors molt més potents que els actuals, ja que algunes de les activi-

tats que demanen un gran esforç i molt de temps als ordinadors, com ara el reconeixement de formes, són gairebé immediates en el cervell. A la inversa, la possibilitat de modelitzar alguns comportaments cerebrals mitjançant xarxes neuronals i comparar-ne els resultats amb les exploracions locals, obtingudes amb elèctrodes, o globals, obtingudes amb encefalogrames, proporciona un ajut considerable a l'exploració dels mecanismes del cervell, i a la comprensió d'algunes lesions o deficiències, com per exemple la dislèxia o la prosopagnòsia.

Els models de xarxes neuronals han estat molt utilitzats recentment per a tasques de reconeixement d'imatges i constitueixen un nou paradigma per als ordinadors de noves generacions, de caràcter fortament paral·lel, en lloc dels ordinadors clàssics seqüencials. Els seus antecedents són els perceptrons construïts a finals dels anys seixanta, però coneixen realment un gran esclat a partir del model de Hopfield (1980), que relaciona el model neuronal amb un vidre d'espín. A cada neurona se li atribueixen dos estats (+1 o 0), corresponents a activada o no activada, i les interaccions entre elles depenen de les forces de les sinapsis. Donades unes condicions inicials, que modelitzen per exemple l'estímul sensorial, el sistema tendeix a un mínim d'«energia» que, en condicions ideals, correspon a alguna de les memòries emmagatzemades que han de ser recuperades en el procés de classificació o reconeixement (de lletres o nombres, per exemple). Un greu problema és que a més d'aquests mínims globals hi ha nombrosos mínims locals, que corresponen a memòries espúries en què pot restar atrapat el sistema.

Diverses qüestions que es plantegen, de caire més tècnic, es refereixen a si l'actualització de l'estat de les diverses neurones de la xarxa ha de ser successiva o simultània; la situació en què hi ha sinapsis no simètriques (que correspon a la situació real del cervell) i que està relacionada amb l'aprenentatge de sèries temporals; i la modelització dels mecanismes d'aprenentatge, que impliquen modificacions de les sinapsis per a emmagatzemar noves memòries.

Les xarxes neuronals poden ser simulades en ordinadors normals, donant un programari molt potent, o bé poden dur a maquinari nous. Això implica fer-ne realitzacions físiques, molt sovint de tipus optoelectrònic. Les neurones són simulades mitjançant elements fotoelèctrics connectats amb làsers de semiconductors que emeten un pols si la intensitat total rebuda pel sensor supera un cert llindar. Això constitueix l'analogia d'una neurona, que

suma els efectes dels estímuls rebuts de les altres cèl·lules i dispara un potencial d'acció si la suma depassa un cert llindar. Una primera capa de sensors rep el senyal d'entrada; a continuació, els seus polsos làser són dirigits vers una xarxa de difracció, que els dispersa cap a d'altres dispositius com els precedents, situats en una capa posterior i es repeteix l'operació diverses vegades. Al cap d'unes quantes capes (entre cinc i deu, habitualment) el sistema dona un senyal de sortida, corresponent a la classificació. L'entrada, per exemple, podria ser una lletra defectuosa i la sortida, la lletra corregida. L'aprenentatge consisteix a modificar les xarxes de difracció intermèdies per tal que el dispositiu faci bé la funció de reconeixement.

2.2.2.3. La memòria a curt termini

La memòria a curt termini depèn de modificacions en la concentració d'AMP cíclic i els seus mecanismes són molt menys coneguts que no pas els de la memòria a llarg termini. Els experiments típics consisteixen en el següent: uns micos (o uns humans) miren atentament el centre d'una pantalla. S'encèn un llum en la zona marginal de la pantalla, però els micos estan ensinistrats a no deixar de mirar la taca lluminosa central. Quan aquesta s'apaga (poc després que s'hagi apagat la taca lluminosa lateral), el mico està ensinistrat a mirar cap a la part on va lluir la taca lateral. Els micos tenen elèctrodes instal·lats en una part del còrtex frontal relacionada amb la detecció de direccionalitat, on hi ha un conjunt de neurones, cadascuna de les quals està sintonitzada a un cert angle, és a dir, la seva activitat és màxima, durant un cert temps, si rep un impuls en la zona corresponent al seu angle. Aquesta activitat dura un temps relativament breu, passat el qual ja no sabem en quina zona va lluir la taca lateral.

2.2.2.4. Mort de neurones

Les amnèsies són un dels trastorns més inquietants, en què l'individu no perd la consciència del present, però els records i projectes li resulten inaccessibles, i viu el present sense trobar-li un sentit, com un enigma en el qual no reconeix les persones ni els objectes, ni sent

motius per actuar. Durant molt de temps, la recerca de les zones del cervell relacionades amb la memòria fou duta a terme a partir de diverses menes d'amnèsia: amnèsia motriu (apràxia), oblit de gestos, oblit de llenguatge (afàsia), i agnòsies tàctils, visuals i auditives.

En animals poc evolucionats les neurones són capaces de regenerar-se, però no en els primats i els humans. Una possible explicació de l'avantatge evolutiu d'aquest fet podria ser la d'evitar interferir en les xarxes de sinapsis que emmagatzemen les memòries. Quan aquestes xarxes són relativament poc complexes, la interposició de noves neurones no tindria tants efectes com quan la connectivitat és molt elevada. Per això, quan mor una neurona, el cervell no en posa una altra en el seu lloc, sinó que les neurones restants refan la xarxa i produeixen noves sinapsis.

Resultà molt sorprenent, per això, observar que en alguns punts del cervell hi pot haver reparació de neurones. Des del 1965 s'havia descrit el desenvolupament de neurones en el cervell de ratolins i en els anys vuitanta en el cervell de canaris. En concret, la reparació esmentada no s'efectua directament a través d'una divisió de neurones, sinó a partir d'unes cèl·lules mare, indiferenciades i versàtils — com les cèl·lules de la medul·la òssia que donen lloc a les diferents cèl·lules de la sang (eritròcits, leucòcits, plaquetes...). El 1998, Erikson, Gage i d'altres descobriren que en l'hipocamp, relacionat amb la memòria i l'aprenentatge, es produeixen neurones noves a partir de cèl·lules mare, tot i que en nombre molt limitat. Aquestes cèl·lules mare també es troben en alguns altres llocs del cervell, però no treballen; si ho fessin, el cervell tindria un considerable potencial de regeneració neuronal, que seria decisiu en el tractament de malalties com la de Parkinson, deguda a la mort de neurones productores de dopamina, i en accidents cerebrovasculars.

La capacitat de regeneració neuronal augmenta amb l'estimulació, segons ho indiquen experiments amb ratolins en ambients enriquits amb jocs i rodes, que mostren més massa cerebral, més connexions, més gruix d'estructures, mentre que, en canvi, l'estrès redueix aquesta capacitat.

2.2.3. *Qüestions conceptuals*

Hem vist que la memòria neuronal s'emmagatzema en les sinapsis de les xarxes de grans nombres de neurones. Això ens pot

servir de metàfora social: també en la societat hi ha molts individus, i les relacions entre ells contribueixen no tan sols al present sinó al teixit de la memòria.

La memòria individual ha estat complementada per la col·lectiva, expressada en els ensenyaments orals, en els escrits, en l'acumulació d'arxius. La informàtica ha augmentat molt les possibilitats d'aquesta memòria. És temptador preguntar-se si algun dia serà possible combinar, si més no parcialment, les neurones del cervell amb un ordinador complementari que contingues una gran quantitat d'informació útil, de manera que a la memòria instintiva de l'espècie s'hi afegís una memòria cultural. Assaigs amb pròtesis sensorials en la còclea o la retina i en neurocirurgia funcional estan posant de manifest l'eficàcia d'algunes prolongacions artificials del sistema neuronal.

2.3. EL SISTEMA IMMUNITARI

Una tercera forma de memòria que contribueix a definir la identitat de l'individu és la del sistema immunitari, que ataca els cossos estranys al jo i conserva la informació de les malalties experimentades. El sistema immunitari ha rebut atenció especial des de dues perspectives; en la cirurgia de transplantaments, cal reduir el rebuig immunitari, cosa que ha permès grans progressos en cirurgia, fins a arribar a la possibilitat de transplantaments tan emblemàtics com el del cor (1967). D'altra banda, algunes disfuncions greus del sistema immunitari, en concret la SIDA, han esdevingut un flagel contra la salut i constitueixen un dels reptes més vius de la medicina actual.

L'exploració del sistema immunitari va començar a finals del segle passat, amb els estudis del zoòleg rus Elie Metchnikoff sobre la fagocitosi i la immunologia cel·lular, i els de Paul Ehrlich sobre immunologia humoral, que el dugueren a formular per primera vegada la idea de l'existència de receptors específics en les cèl·lules relacionades amb els processos immunològics.

Després de la segona guerra mundial, la immunologia tingué un creixement molt ràpid i començà a esdevenir una ciència ben caracteritzada i reconeguda. Algunes fites són: el 1948, A. Fagraeus descobreix que la síntesi d'anticossos es produeix a les cèl·lules plasmàtiques; el 1953 és descoberta la immunoglobulina A i el 1968

la darrera immunoglobulina, la E, relacionada amb processos al·lèrgics; el 1959, M. Burnet postula que cada antigen només reacciona amb les cèl·lules que tenen receptors adients i en provoca la proliferació; el 1975, L. Milstein i P. Kohler produeixen els primers anticossos monoclonals (anticossos completament idèntics), que han esdevingut una eina clau en biologia i medicina.

2.3.1. *El jo biològic i l'altre*

Cap al 1950, P. Gorer va descobrir que tots els organismes tenen en la superfície de les cèl·lules uns marcadors moleculars que distingeixen un individu dels altres. S'anomenen *molècules d'histocompatibilitat*, i algunes d'aquestes tenen un paper especialment destacat: són les especificades per un conjunt de llocs genètics que ocupen una regió del DNA anomenada *MHC* (complex major d'histocompatibilitat), i tenen com a missió la resposta immunitària de l'organisme contra invasors. En els humans, aquestes molècules s'anomenen *HLA* (antígens leucocitaris humans, codificades per gens del cromosoma 6); algunes d'elles (*HLA-1*) es troben a totes les cèl·lules i d'altres (*HLA-2*) només sobre els leucòcits.

Una qüestió crucial és com els limfòcits *T* poden reconèixer una cèl·lula infectada si aquesta no mor ni allibera els virus del seu interior. P. C. Doherty i R. M. Zinkernagel posaren de manifest el paper que hi desenvolupen les proteïnes del *MHC*. Quan un invasor entra a l'organisme, els macròfags en degraden les proteïnes, els pèptids de les quals es combinen amb les proteïnes *HLA* i van pujant a la superfície de la cèl·lula, on són distingits pels limfòcits *T* coadjuvants, un tipus de leucòcits (produïts a la melsa). Un cop activats, aquests segreguen unes proteïnes que promouen la replicació de limfòcits *T* citotòxics (immunitat cel·lular) i de limfòcits *B* (immunitat humoral) (produïts a la medul·la òssia). Els limfòcits *T* ataquen les cèl·lules infectades i els *B* segreguen anticossos que reconeixen pèptids específics de la superfície dels virus i marquen les partícules víriques lliures. Així, les immunoglobulines i els receptors de les cèl·lules *T* són els elements de reconeixement dels antigens. Cada cèl·lula *B* o *T* ataca només un tipus d'antigen o de cèl·lula marcada.

Una altra pregunta clau és com s'ho fa l'organisme per poder reconèixer molècules (antígens) amb què mai no havia estat en contacte. Això s'aconsegueix gràcies a una gran diversitat d'unió en les

zones d'unió del DNA. Els gens dels receptors tenen quatre parts, V, D, J i C, corresponents a quatre cadenes d'aminoàcids, i les zones d'unió en el DNA perden i guanyen aleatòriament parells de bases. El nombre de combinacions és molt elevat: hi ha 150 variants del fragment V, 30 del fragment D i 6 del fragment J (situats en el cromosoma 14): són possibles, doncs, 27.000 combinacions aleatòries. La part C pot codificar 6.000 cadenes (en el cromosoma 2) o 1.000 cadenes (en el cromosoma 22). Cada anticòs combina a l'atzar dues cadenes pesants i dues de lleugeres, assolint així una gran varietat de possibilitats.

Finalment, cal recordar que el *HLA* no és l'únic indicador del jo biològic. Alguns altres diferenciadors els trobem, per exemple, en els grups sanguinis, descoberts per Landsteiner a principis del segle XX, que són deguts a proteïnes de membrana dels glòbuls vermells, que determinen el grups A, B, AB i O, dels quals depèn l'aglutinació o dels glòbuls vermells.

En el cervell no hi ha macròfags, que podrien matar neurones. El seu paper és desenvolupat per la microglia, unes cèl·lules estrellades que formen part de la glia, estudiades des de 1919 per Pío del Río-Hortega, deixeble de Ramón y Cajal, que el 1932 proposà el seu caràcter de macròfags. Aquest ha estat demostrat el 1985, amb l'ajut d'anticossos monoclonals i després de demostrar que no provenen de l'exterior del cervell. La microglia té un paper defensiu, també segrega factor de creixement neuronal, i les seves substàncies de defensa poden ser perilloses si se les perd de control: això és el que passa, per exemple, segons es creu, amb les malalties de Parkinson, d'Alzheimer, de Lou Gehrig, l'esclerosi múltiple, l'infart cerebral, i altres malalties neurodegeneratives que es produeixen amb l'edat, quan es perd el control sobre l'activitat de la microglia.

Cal distingir entre la immunitat innata i l'adquirida. Formen part de la primera els macròfags i diverses proteïnes que es troben a la sang i que contribueixen a eliminar els invasors. La immunitat adquirida aparegué fa uns cinc-cents milions d'anys en els vertebrats, i es caracteritza pels limfòcits *B* i *T*, a més d'altres tipus de proteïnes més variats. La immunitat adquirida té la característica de la memòria: es conserven cèl·lules sensibles a un determinat antigen, de manera que la segona reacció pugui ser més ràpida que la primera. Així, quan ens fem un petit tall que es cicatritza perfectament, la memòria cerebral pot oblidar-lo, però la memòria immunològica no. Recentment s'ha desenvolupat molt la immunologia comparada de verte-

brats i invertebrats, interessant per la possible aplicació a vertebrats d'algunes menes de defenses aparegudes en els invertebrats.

2.3.2. *Qüestions conceptuals*

La identitat immunitària és una forma d'identitat que culturalment és, afortunadament, poc acusada, ja que com hem vist el jo immunitari es caracteritza per un rebuig del no-jo. La medicina i biologia actuals han intentat vèncer en el possible aquest rebuig, i gràcies a la superació del qual ha estat possible la recepció d'òrgans aliens que, tot i formar part del no-jo, han permès la prolongació de la vida del jo.

La SIDA és un dels reptes més urgents de la medicina actual. En les fases inicials, el VIH (virus de la immunodeficiència humana, causant de la SIDA) colonitza els *T* coadjuvants i els macròfags, però és atacat pels *T* citotòxics, que el mantenen a ratlla. No obstant, els VIH tenen moltes mutacions i al final no poden ser reconeguts i guanyen la partida al cap d'un temps variable de latència. L'esperança de vida està baixant a l'Àfrica, on cal canvis de comportament sexual i una millor distribució econòmica de la sanitat. Als Estats Units, en canvi, la mortalitat produïda per la SIDA ha disminuït en un 45 %, cosa que porta a la reflexió, tant pel que fa a la disparitat de condicions de vida com a la distribució tan desigual de medicaments i de prioritats de la recerca.

2.4. CONCLUSIONS

Dividirem aquesta secció de conclusions en dos apartats: el primer, més abstracte, es refereix a les qüestions de la permanència; el segon, més concret, als debats ètics, legals i socials a l'entorn dels temes tractats en aquest capítol.

2.4.1. *La permanència*

2.4.1.1. La sensació de fusió amb el món del vivent

En el capítol anterior ens hem referit a la sensació de fusió amb la natura que provoca la consciència de la permanència de la matè-

ria, i de les seves combinacions per formar part de sistemes successius (ara d'un humà, ara del fang, ara d'un ocell...) en una mena de cadena de l'ésser. En aquest capítol, hem subratllat la universalitat i la permanència del codi genètic, vàlid per a totes les espècies biològiques, i que constitueix el llenguatge més general de la vida i de l'evolució. Ser-ne concients és una altra font possible de reflexió sobre la pertinença a una realitat que ens depassa, al gran flux de la vida.

Aquesta fusió no és incompatible amb una profunda individualitat. Trobem aquesta tensió entre el col·lectiu i l'individual en els estudis sobre el genoma: d'una banda, indiquen que les diferències genètiques entre humans són molt petites — com també ho són les diferències entre els humans i els primats—; d'altra banda, el coneixement detallat del genoma accentua les possibilitats d'una medicina individualitzada, que tingui en compte els riscos que provenen de l'herència de determinats gens.

2.4.1.2. El caràcter matemàtic del món

En el capítol primer, hem comentat el caràcter matemàtic de les característiques físiques de permanència de l'Univers (l'energia i els valors de les constants, per exemple) i la racionalitat del món expressada en les lleis físiques fonamentals. Trobem aquí una situació semblant: el caràcter algorímic del gen i del cervell; en un cas, una successió de símbols (les bases del DNA) determina les proteïnes, en l'altre, un conjunt de símbols (sinapsis) activats o desactivats conserven els records. Aquest aspecte algorímic queda subratllat per l'ús creixent, en les recerques genètiques i neurològiques, de l'ordinador, que ha esdevingut imprescindible tant per al tractament de les immenses quantitats d'informació dels estudis genòmics com per a la simulació dels comportaments cerebrals. És interessant subratllar, també, la confluència entre els dos tipus d'estudis, ja que la neurobiologia inspira els nous maquinari i programari de les xarxes neuronals, que poden resultar imprescindibles per a l'anàlisi dels gens, que exigeix un grau molt elevat de processament en paral·lel com el que té lloc en el cervell.

2.4.1.3. Platonisme, cervell i genoma

L'evocació de Plató és freqüent en la física, i la d'Aristòtil en la biologia. El caràcter algorísmic de què parlàvem en el paràgraf anterior, i que semblava apropar física i biologia, invita a buscar resonàncies platòniques en la biologia. Plató suggerí l'existència pura de les idees, de les quals els éssers concrets serien una manifestació, i de l'ànima immortal, que constituïria l'essència més profunda de l'individu. Hem trobat, en aquest capítol, dos elements de permanència que tenen una certa analogia amb la permanència dels conceptes i de l'ànima: el genoma de les espècies i la memòria de l'individu.

La generalitat biològica de l'espècie fa pensar en què és allò de comú que permetria definir una espècie. Fins fa poc, aquests elements comuns eren genotípics, visibles de manera més o menys directa. Actualment, podríem afinar-ho més amb una descripció detallada del fenotip, és a dir, amb el genoma de l'espècie que, amb un cert nombre de variacions individuals, modela la forma i el funcionament dels individus. La sensació de permanència que produeixen les espècies és relativament fràgil, especialment en el nostre temps, en què l'activitat humana en fa desaparèixer tantes.

Els records estableixen un fil de continuïtat entre els nens que fórem i els adults o els vells que hem arribat a ser. El metabolisme ens va canviant a nivell material, tot adquirint, transformant i expulsant contínuament matèria. Per això, la nostra continuïtat es troba més aviat en les formes que no pas en la matèria. Quan Plató parlava d'ànima, o Aristòtil atribuïa a la forma més que a la matèria un caràcter essencial i permanent de l'individu o quan la teologia medieval prenia aquesta forma per a fer-ne correlatiu de l'ànima, apuntaven a alguna cosa ben essencial i profunda i que era més aviat informació que no pas matèria. Gens i cervell són les bases de dues formes d'informació que constitueixen una part molt profunda de nosaltres. La idea d'una ànima més enllà de qualsevol matèria suggeriria la idea d'immortalitat, potser en forma de record en el pensament de Déu.

2.4.1.4. El fatalisme genètic

Des del punt de vista cultural, la idea d'un determinisme hereditari ha estat molt present al llarg de la història. Algunes malalties

o desgràcies eren atribuïdes, en la Bíblia i en tradicions culturals molt diverses, a algun pecat dels pares, dels avis o d'antecessors més llunyans. Actualment, aquella mena de maledicció moral ens sembla llunyana i feréstega i ens costa de comprendre. Tot i això, vivim una forma de fatalisme genètic que troba un camp abonat en els mitjans de comunicació, que parlen amb detall del gen de la bogeria, de l'homosexualitat, de la infidelitat, de l'alegria, de la violència, com si estiguéssim determinats genèticament en gairebé tots els aspectes. No es té la precaució de matisar que els gens rarament actuen aïllats i que la seva acció particular depèn de l'estrès i d'esdeveniments moleculars relacionats amb el món exterior, en el qual pesen també els entorns cultural i social. Aquestes interpretacions genètiques tenen diverses lectures socials: en alguns casos, semblen legitimar i donar carta de naturalesa a conductes socials que eren mal vistes; en altres ocasions, poden ser utilitzades com a pretext per disminuir els ajuts socials, ja que si un defecte ve determinat ineluctablement per la genètica seria inútil malversar diners per corregir-ne els efectes; en altres ocasions, el fatalisme genètic s'utilitza per justificar diferències socials, que serien degudes no a un context social sinó a la genètica.

Un fatalisme semblant està relacionat amb els neurotransmissors, de què depèn tan fortament el caràcter dels individus. Característiques com l'ansietat, l'optimisme, la memòria, alguns tipus d'intel·ligència, vindrien determinades per l'excés o el defecte de neurotransmissors. Per exemple, l'atenció maternal a les cries depèn en bona part de la concentració d'oxitocina, segons que indiquen experiments amb ratolins i amb ovelles. Dintre de les qüestions cervell i ment, o matèria i esperit, els filòsofs han diferenciat entre el substracte material —neuronal— de la memòria i la memòria pròpiament activa, la que posa la intencionalitat i la interpretació i la valoració en els records emmagatzemats en el cervell, però el progrés en els detalls de la relació entre neurotransmissors i caràcter sembla accentuar les lectures més deterministes i materialistes.

2.4.1.5. La ruptura de barreres

En contrast amb aquest determinisme, vivim també un trenca-ment de barreres biològiques que sembla que el puguin desafiar i superar. La biologia recent ha permès començar a esquerdar diver-

sos tipus de barreres: la genètica (amb l'enginyeria genètica i les espècies transgèniques), la immunitària, amb la reducció del rebuig en transplants, i fins i tot la neuronal, amb el desenvolupament de neurofàrmacs basats en neurotransmissors. També hem trencat les barreres entre els humans i les màquines, tant pel que fa a les pròtesis més convencionals com a petits estris informàtics connectats directament al sistema nerviós (a la còclea o a la retina, per exemple), per tal de superar algunes formes de déficits sensorials. Ens podem preguntar si algun dia podrem ampliar la memòria personal tot combinant el cervell amb ordinadors connectats al cervell i que ajudin a l'emmagatzematge i el processament de dades.

2.4.2. *Els debats ètics, legals i socials*

El trencament de les barreres esmentades planteja nombroses qüestions ètiques, legals i socials, que passem a comentar tot seguit:

2.4.2.1. La informació

La rapidesa dels progressos científics fa que no ens puguem re-
fiar del que hem après durant els anys d'estudi i haguem d'estar
pendents de les novetats, que ens acostumen a arribar a través dels
mitjans de comunicació. És important, doncs, analitzar com ens
arriba la informació sobre aquests temes. Cal destacar, en primer
lloc, que molts dels anuncis són precipitats i que les perspectives re-
als són a molt més llarg termini del que deixen entendre. Per exem-
ple, se'ns ha dit que gairebé tot el genoma humà estava seqüenciat,
sense dir-nos amb prou claredat que cal encara la part més difícil:
arribar a comprendre com funciona. Així, encara no sabem si tenim
50.000 gens o 80.000, ni quins gens s'expressen, ni com es regulen,
ni com actuen, ni quina funció tenen, mentre que la premsa ja parla
com si les repercussions mèdiques estiguessin a l'abast.

Cal destacar, també, el paper de l'economia i la política en
aquestes notícies. Com que darrere d'aquestes recerques hi ha des-
peses milionàries, i perspectives encara més milionàries, hi ha una
pressió enorme que impulsa a la precipitació. Notícies de premsa
poden fer pujar i baixar els valors tecnològics amb una gran rapide-

sa, poden determinar la concessió o la prolongació de subvencions considerables i poden enfortir o malmetre els prestigis nacionals o estatals en recerca. Per això, no ha d'estranyar que el president dels Estats Units i el primer ministre de la Gran Bretanya volguessin estar presents en la gran roda de premsa del 26 de juny de 2000 de l'anunci de la (quasi) finalització de la seqüenciació del genoma humà.

2.4.2.2. Els transgènics

Les fantasies sobre combinacions estranyes d'animals són antiquíssimes: les trobem en les llegendes sobre centaures, quimeres, sirenes, unicorns i en tota una imatgeria fantàstica. L'enginyeria genètica ha permès d'aconseguir plantes i animals transgènics, és a dir, que incorporen alguns gens que no són propis de la seva espècie, i que en part realitzen, de manera menys aparatosa, algunes d'aquestes fantasies. El 1984 s'aconseguí la primera planta, i poc després el primer animal, i el 1995 se n'inicià la comercialització.

Els aspectes positius són la possibilitat d'aconseguir plantes o animals més resistents a la sequera, amb més contingut nutricional i més resistents a plagues o malalties, cosa que sempre han intentat els agricultors i ramaders produint creuaments per tal de millorar les espècies. Els debats se centren en si els aliments transgènics poden afectar la salut, en si arruinaran la diversitat biològica, i en si deixaran l'alimentació mundial en mans d'unes poques indústries. En el cas d'animals transgènics, la majoria d'investigacions són utilitzats per a l'estudi de malalties com la diabetis o d'altres, i per veure quin paper hi tenen els gens. La pressió social és molt gran a Europa i això provoca retards respecte dels Estats Units.

Als debats econòmics està associada la discussió sobre la llicitud de patentar gens o organismes transgènics. D'una banda, representa patentar formes de vida, cosa que resulta com a mínim sorprenent, si no, fins i tot, irritant. D'altra banda, les inversions necessàries per a la recerca i el desenvolupament en aquest camp són immenses i és lògic i legítim voler-les recuperar, amb uns certs beneficis. Després de debats considerables, s'ha decidit legitimar les patents sobre gens i organismes transgènics, sempre i quan hom faci algunes previsions de quines possibles utilitats concretes podria tenir el seu coneixement, és a dir, no tant dels gens en si com de les possibilitats d'ús d'algunes característiques concretes.

2.4.2.3. Diagnòstic i teràpia gènica

El coneixement dels gens responsables d'algunes malalties hereditàries permet diagnosticar precoçment si una persona serà propensa a alguna d'aquestes malalties. Això té l'avantatge de poder aconsellar a la persona un règim de vida que retardi al màxim o, en alguns casos, eviti l'aparició de la malaltia. Però aquesta situació planteja també diversos problemes: en el període abans del naixement, el problema de l'avortament; per a una persona ja conscient, el coneixement de la propensió o fins i tot de la ineluctabilitat de malalties genètiques, pot resultar molt feixuc i hipotecar-lo psicològicament amb una angoixa prematura i insuperable. A part d'aquest problema psicològic, hi ha un vessant social: el coneixement de la propensió de les persones a presentar malalties genètiques podria resultar també perjudicial per a aquestes cara a les companyies d'assegurances o de les empreses que lloguessin els seus serveis, que li encaririen les pòlisses o no el voldrien assegurar. Per això, el debat sobre els avantatges i els inconvenients d'aquests factors —actualitzat per algunes disposicions recents, en alguns països, que permetrien a les asseguradores exigir aquesta mena d'informes sobre els seus clients— és molt viu en la nostra societat.

Les possibilitats de guariment són més llunyanes. Hi ha algunes malalties monogèniques, és a dir, que depenen d'un sol gen: corea de Huntington, fibrosi quística, fenilcetonúria, hemofília, i d'altres malalties poligèniques que depenen d'una combinació de gens: diabetis, esquizofrènia, Alzheimer. Algun dia serà possible desactivar o canviar un gen —tot i que és molt difícil, ja que està repartit al llarg del DNA, i molt arriscat, ja que pot modificar altres gens en el procés— i trencar la propagació d'algunes d'aquestes malalties. En el cas de malalties poligèniques, la dificultat és molt més gran.

2.4.2.4. Els transplantaments

La ruptura de barreres immunitàries (amb fàrmacs com és ara la ciclosporina) ha permès transplantaments d'òrgans molt diversos, especialment ronyó i cor. Els transplantaments presenten aspectes no estrictament mèdics, com la manca de donants, que duu problemes ètics referits als criteris de selecció (per riquesa, per edat, per situació familiar?).

Això ha dut a buscar òrgans de recanvi en altres espècies, especialment porcs, que ja subministren algunes vàlvules cardíques, i que es reproduïxen més que els primats, els quals fan por pels virus, com el de la SIDA i de l'Ebola, que han transmès recentment de manera epidèmica als humans. En els xenotransplantaments (transplantaments d'òrgans d'altres espècies) hi ha els problemes d'un rebuig sobreagut, i de la compatibilitat anatòmica i fisiològica dels òrgans amb l'individu. Per poder-los dur a terme, caldria afegir alguns gens al porc, o impedir que es llegissin alguns dels seus gens, per tal de fer els seus teixits més compatibles amb els nostres. També s'intenten aconseguir òrgans artificials, cosa que suposa problemes de selecció de materials i de subministrament d'energia.

2.4.2.5. La clonació

S'ha aconseguit clonar alguns animals, és a dir, obtenir fills que fossin genèticament idèntics al pare o a la mare. Les nombroses discussions que aquest fet ha suscitat evoquen la influència dels antecedents nefastos de les polítiques eugenèsiques nazis i, d'altra banda, la imaginació d'alguns novel·listes que, com Aldous Huxley a *Un món feliç*, preveïen una societat de castes biològiques produïdes artificialment. Per exemple, tot i que a la pràctica és molt difícil, costa poc imaginar la temptació de combinar gens de la violència, de la disciplina i de la fortalesa física, fer un soldat transgènic i clonar-lo multitudinàriament, o construir individus preparats per treballar incansablement i disciplinadament.

Deixant de banda, per ara, aquestes fantasies, la clonació ha esdevingut un tema de discussió bioètica per motius més imminents. Aplicada a animals i plantes, la clonació pot contribuir a salvar espècies amenaçades —i, segons alguns autors, fins i tot podria refer espècies desaparegudes, per exemple, plantes conservades en herbaris. Aplicada a humans, però, la clonació és problemàtica. Podria ser permesa la clonació no reproductiva amb finalitat terapèutica, per a obtenir teixits i línies cel·lulars de recanvi, però no per a obtenir individus nous, tot i que probablement seria preferible treure més rendiment de les cèl·lules mare —és a dir, encara no completament diferenciades i que poden donar lloc a cèl·lules molt diverses.

II. EL TEMPS

Temps com a roda, com a fletxa, com a punt, és a dir, com a cicle repetitiu, com a corrent irreversible, com a instant singular. Aquest flux, que representem lineal, no és més adequadament representat com a turbulent? Aquest corrent, és un continu o bé una successió de singularitats? El caràcter essencial del temps, és l'instant o la durada? La física sembla apuntar al primer, tot i que potser el temps de Planck constitueixi una granulació quàntica insuperable i essencial del temps. La psiconeurologia sembla indicar, en canvi, un quàntum de consciència temporal, determinat tant per les limitacions dels fluxos sensorials com pel funcionament dels impulsos cerebrals.

En les cultures molt vinculades a la natura, el cicle anual té una gran importància: les festes i la vida social s'organitzen al seu entorn, seguint les pautes del treball agrícola, i la litúrgia subratlla la dimensió sagrada de cada instant. Per a algunes cultures el cicle pot ser més llarg: els maies, per exemple, tenien cicles de 52 anys —període en què coincidien el calendari sagrat de 365 dies i el civil de 13 mesos de 20 dies, corresponents a 13 déus i a la base numèrica 20 utilitzada en els seus càlculs— al cap dels quals emigraven i feien cerimònies perquè no s'acabés la Terra. Temps circular i temps lineal són dues opcions en pugna: en el món clàssic, són freqüents els pensadors que interpreten el temps com un fluir recurrent. La Bíblia i el cristianisme introdueixen un temps lineal, orientat vers la salvació, que després repercutirà en la versió laica del temps del progrés. La vida moderna participa alhora dels tres aspectes del temps: un arrossegament per la trepidació del ritme de vida d'innovacions (fletxa), la rutina i repetició de dies semblants

als altres en feines rutinàries (roda) i l'engrunament del temps i de la consciència en moments desvinculats els uns dels altres (punts).

En aquesta segona part, tractarem les perspectives molt diverses que les ciències introdueixen sobre el temps. La física parla de determinisme en la mecànica clàssica, d'indeterminisme en la mecànica quàntica, d'impredictibilitat en les teories del caos, de dependència del temps amb el moviment en la teoria de la relativitat, de l'origen i la fi del temps en cosmologia, d'irreversibilitat en termodinàmica. La biologia estudia ritmes vitals i rellotges biològics, exploracions i novetats en l'evolució, destruccions en l'envelliment i la mort. Aquesta diversitat és comparable a la que han manifestat els filòsofs i els escriptors.

Alguns filòsofs han manifestat la dificultat de definir el temps, i d'altres han dubtat de la seva realitat. Aristòtil en subratlla la naturalesa obscura: «que no existeix, o que la seva existència és imperfecta i obscura, ho posa de manifest el fet que, d'una banda, ha estat i ja no és i que, d'altra, serà però encara no és: així es componen el temps infinit i el temps indefinidament periòdic. Per tant, el que està compost de no ser sembla no poder participar de la substància. Així doncs, els éssers eternals no són en el temps: la prova és que el temps no té cap efecte sobre ells». Per a Aristòtil, el temps està lligat al canvi i al moviment i defineix el temps com «el nombre del moviment respecte de l'anterior i el posterior». Aquestes qüestions seran repeses per sant Tomàs d'Aquino en la *Summa Theologica*, on es pregunta si Déu és en el temps o fora del temps i, en aquest cas, com pot actuar en el temps.

Sant Agustí, en *Les Confessions*, escriu: «Què és el temps? Si ningú no m'ho pregunta, ho sé, però si algú m'ho pregunta i ho vull explicar, em trobo que ja no ho sé. Tanmateix, declaro que si res no passés, no hi hauria temps passat; que si res no arribés, no hi hauria temps a venir; que si res no fos, no hi hauria temps present». I es pregunta si aquests temps, el passat i el futur, són realment, atès que ja no és o que encara no és. «Si el present fos sempre present no seria temps, sinó eternitat. Però si el present, per tal de ser temps, ha de reunir-se amb el passat, com podem afirmar que sigui, si per tal de ser ha de deixar de ser? El que ens autoritza a dir que el temps és, és que tendeix a no ser».

Aquests textos són ben reveladors de les dificultats de comprendre el temps. També els poetes, com Paul Valéry, s'han fet ressò d'aquestes dificultats: «Prenc al vol el mot Temps. Aquest

mot era absolutament límpid, precís, honest i fidel en el seu servei..., però vegeu-lo tot sol. Es revenja. Ens vol fer creure que té més sentits que no pas funcions. No era més que un mitjà i, heus-lo ací esdevingut un fi, objecte d'un terrible desig filosòfic. Es transforma en enigma, en abisme, en turment del pensament». Més sovint han destacat la fugacitat de la vida, tema permanent de la reflexió humana, i han invitat a fruir del temps: el *Carpe diem* d'Horaci o el *Cueillez dès aujourd'hui les roses de la vie* de Ronsard. Per difícil que en sigui la conceptualització, l'experiència diversa del temps forma part de la nostra vida més profunda.

Altres filòsofs han cregut que el temps no prové pas de l'experiència, sinó que és condició d'ella. Kant, a la *Crítica de la raó pura*, afirma que el temps no és un concepte empíric sinó una representació necessària que serveix de fonament a totes les intuïcions, una dada a priori sense la qual tota intuïció dels fenòmens és impossible. Bergson oposa el temps de l'existència viscuda al temps de la ciència; subratlla que aquesta deixa escapar la realitat temporal de la duració, que és donada immediatament a la consciència, i reprèn la perplexitat del present com a instant matemàtic que separa el passat del futur, i que pot ser concebut, però no pas percebut. Per a Bergson, el que percebem és un gruix de durada que es compon del passat immediat i del futur imminent i la consciència del temps és la línia d'unió entre el que ha estat i el que serà.

3. LA FÍSICA I EL TEMPS

La física presenta el temps amb una esponerosa multiplicitat de formes, moltes d'elles sorprenents: l'edat de l'Univers, el ritme dels oscil·ladors, les evolucions caòtiques dels atractors estranys, el temps dependent de l'observador en relativitat, les singularitats dels forats negres i de l'origen de l'Univers... Aquesta multiplicitat ha impressionat filòsofs i literats que, tanmateix, ja havien observat i descrit la riquíssima diversitat del temps de l'experiència vital i de la reflexió aprofundida.

Per evocar aquesta diversitat, començarem parlant de les unitats i la mesura del temps i continuarem amb una exploració del temps en la mecànica clàssica i la quàntica, en relativitat especial i general, en cosmologia i en termodinàmica. Cadascuna d'aquestes consideracions ens obriran noves visions sobre el temps: la predicibilitat, la relativitat, la irreversibilitat, l'origen i la fi de l'Univers. A més, la física ha esberlat els límits imaginables de la temporalitat: els ha eixamplat fins a l'origen de l'Univers, amb xifres de l'ordre de milers de milions d'anys, i ha observat partícules elementals inestables la durada de les quals és inferior a la bilionèsima de segon. Aquestes temporalitats, però, presenten qüestions obertes, com per exemple la compatibilitat del temps reversible de la microfísica i el temps irreversible de la termodinàmica o la possibilitat de viatges en el temps o de velocitats més elevades que la de la llum.

3.1. UNITATS I MESURES DEL TEMPS

Els mètodes de mesura del temps i les seves unitats influeixen profundament, tot i que de manera inconscient, en la percepció de la temporalitat i en el ritme de vida en les diverses èpoques de la història i les diverses cultures. Per això, començarem aquesta panoràmica sobre el temps de la física amb unes consideracions breus sobre l'evolució de les unitats i els mètodes de mesura.

3.1.1. *Unitats*

Podem distingir quatre etapes en la definició dels patrons de longitud i de temps: la primera, lligada al cos humà; la segona, relacionada amb la Terra; la tercera, vinculada a l'àtom, i la quarta, relacionada amb constants universals. En la primera etapa, l'home és la mesura de totes les coses: el colze, el braç, el peu, la polzada, són patrons de longitud; el batec del cor és una unitat de temps utilitzada encara per Galileu en els experiments sobre el pèndol i el pla inclinat.

Però el cos humà presenta variacions massa notables per ser pres com a patró de mesura. Es passà a aspirar, doncs, a una certa universalitat. Per això, a finals del segle XVIII, es va proposar prendre la Terra com a referència i la nova unitat de longitud, el metre, fou definida com la deumilionèsima part de la longitud del quadrant del meridià terrestre, obtinguda a partir de la mesura de l'arc de meridià entre Dunkerque i Barcelona el 1799, que ha durat fins a mitjan segle XX. La unitat de temps, el segon, fou definida com a $1/86.400$ de dia solar mitjà, és a dir, del període de rotació de la Terra sobre si mateixa, definició que requereix, de fet, algunes subtilitats astronòmiques (per exemple, el dia sideral val 86.164 segons).

Però si pretenem universalitat, no podem prendre la Terra com a patró. Al cap i a la fi, la Terra existeix des de fa tan sols uns 4.500 milions d'anys; la seva grandària no té un significat especial, ja que els altres planetes tenen grandàries diferents (la massa de Júpiter és 318 vegades la de la Terra, la massa de Mart és $0,11$ vegades la de la Terra...) i els períodes de rotació dels diversos planetes sobre l'eix respectiu són també diferents (per a Mart, $24,6$ hores; per a Júpiter, $9,9$ hores; per a Venus, 243 dies). A més, la durada del dia terrestre no és regular (pot ser modificada per la grandària relativa dels cas-

quets de gel polars, o per la fricció entre la rotació del nucli líquid i del mantell sòlid de l'escorça terrestre) i s'ha anat allargant des que es formà. Hom calcula que inicialment, quan la Terra encara no havia expulsat la massa que formaria la Lluna, el període de rotació era tan sols de sis hores; quan la Lluna començà a orbitar al voltant de la Terra, les fortes marees començaren a frenar la rotació terrestre i allargaren el dia, de manera que fa uns 4.000 milions d'anys el període de rotació valia 14 hores. Fa uns 500 milions d'anys, el dia durava unes 23 hores, tal com ho indiquen les línies de coralls fòssils utilitzades per estudiar el paper dels ritmes diürns. Paral·lelament a aquest alentiment de la rotació terrestre, hi ha un allunyament de la Lluna, com a conseqüència de la llei de conservació del moment angular, a un ritme que actualment val uns 5 cm per any i el dia s'allarga 1/50.000 segons per any, de manera que dintre d'uns 225 milions d'anys el dia durarà 25 hores.

De la contingència de l'humà hem passat a la contingència del terraquí. Si busquem alguna entitat física més permanent i universal que la Terra, trobem els àtoms. Per això, la Terra fou desplaçada per l'àtom com a referència per als patrons de mesura. Així, el 1964 es passà a definir el metre com la longitud igual a 1.650.763,73 vegades la longitud d'ona en el buit de la radiació corresponent a la transició entre els nivells $2p^{10}$ i $5d^5$ de l'àtom de criptó 86, i el segon com la durada de 9.192.631.770 períodes de la radiació corresponent a la transició entre els dos nivells hiperfins de l'estat fonamental de l'àtom de cesi 133, corresponent a la inversió de l'espín de l'electró exterior. Tanta precisió resulta necessària en el món actual en què, per exemple, els diversos canals de telecomunicacions han de tenir freqüències molt precises.

Però per què cal privilegiar una transició d'un cert àtom sobre altres transicions d'altres àtoms? A més, la gran majoria de nuclis atòmics per sobre de l'heli 4 es van formar en el centre de les estrelles o en explosions de supernoves, quan l'Univers ja tenia uns quants milions d'anys. En canvi, la llum ha anat, en el buit, sempre a la mateixa velocitat —recordem que és una constant universal de la natura— i ha existit des dels primers instants. Per això, en la Conferència General de Pesos i Mesures de 1983 es passà a definir el metre en funció de la velocitat de la llum, com el trajecte recorregut per aquesta en el buit durant 1/299.792.458 segons. La unitat temporal, en canvi, segueix referida, per ara, al segon atòmic per la definició de 1964.

3.1.2. *Mesura del temps*

La història de la mesura del temps, és a dir, l'evolució de rellotges i de calendaris i la seva influència sobre la manera de viure i d'entendre el món, és un tema apassionant, i n'hi ha una abundant bibliografia. Aquí en sintetitzarem els conceptes principals. Els antics (egipcis, grecs, caldeus...) utilitzaren per a la mesura del temps el rellotge de sol (des del segle X aC) i el rellotge d'aigua i de sorra (des del segle XV aC). Durant molts milers d'anys, la vida era regida pel Sol i la mesura de les hores tingué poca importància. De mica en mica, l'interès religiós per precisar les hores de les oracions en els monestirs i ciutats cristianes o en les caravanes i ciutats musulmanes promogué una presència pública cada vegada més extensa de les hores.

El rellotge de sol està basat en la periodicitat de la rotació de la Terra sobre ella mateixa; els rellotges d'aigua o de sorra estan basats, en canvi, en un flux no periòdic corresponent a la disminució de l'aigua o de la sorra continguts en un receptacle. Ambdós procediments —periodicitat, decaïment— han estat explotats més recentment per a la mesura del temps: els rellotges atòmics, decisius en la mesura d'interval·ls brevíssims, i els rellotges basats en les desintegracions nuclears, que han revelat l'edat de la Terra.

Considerem, en primer lloc, els moviments amb un període definit: rellotges de pèndol, de cristall de quars o d'àtoms de cesi, tots ells amb el seu propi ritme intern, independent del ritme solar. En el segle XIV, moltes catedrals (Salisbury, Milà i Estrasburg entre les primeres) es doten de rellotges que extreuen l'energia del descens d'un pes i que són regulats per un escapament de balancí o *foliot*, que pauta i regula la rotació d'una roda de corones; aquests rellotges procedeixen d'antics mecanismes d'engranatges que intentaven reproduir els moviments del Sol i els planetes. Com que l'oscil·lació del balancí no tenia un període propi ben definit, era habitual que aquests rellotges tinguessin imprecisions de més d'un quart d'hora en un dia. El 1583, Galileu observà la isocronia del pèndol simple i tingué la idea d'utilitzar-lo en substitució del balancí com a element regulador, però no ho dugué a terme. Huyghens fou pròpiament l'inventor i constructor del primer rellotge de pèndol, el 1665, i n'explicà la teoria a *Horologium oscillatorium*, de 1673. Per a això, assegurà mitjançant un escapament d'àncora la isocronia del pèndol (ja que la freqüència dels moviments d'amplitud ele-

vada depèn de l'amplitud de l'oscil·lació). Els errors van disminuir a uns minuts per dia. Tot i això, la variació de la longitud del pèndol amb la temperatura, els efectes de la fricció de l'aire i la variació de la gravetat segons la posició geogràfica, feien que el rellotge de pèndol tampoc no tingués una precisió extremada. El 1920, W. H. Short proposà un sistema de doble pèndol: un de lliure que oscil·la en el buit a temperatura constant, el qual, mitjançant un dispositiu elèctric, manté sincronitzat el pèndol esclau que indica el pas del temps. S'assolí així una variació menor d'uns deu segons a l'any.

Per eliminar els factors d'imprecisió que afecten el pèndol gravitatori, hom pensà a acudir a d'altres oscil·lacions més precises. El 1929, J. W. Horton i W. A. Marrison utilitzaren com a oscil·lador lliure un cristall de quars, la freqüència natural del qual és de 32.768 Hertz, i que assegurava que les variacions fossin més petites que un mil·lisegon per dia. Des del 1949, hom ha passat a utilitzar com a oscil·lador de control àtoms, primer de criptó i després de cesi, que han permès definir els patrons temporals amb una precisió d'un mil·lisegon per segle. Una mesura molt detallada del temps és necessària, per exemple, en el SPG (sistema de posicionament global) mitjançant satèl·lits, i per a efectuar comprovacions sobre les variacions de ritme predites per la relativitat general, de les quals parlarem posteriorment. Per això, la millora de la precisió de les mesures temporals ha tingut repercussions pràctiques i teòriques molt interessants.

La idea d'emprar, com en el rellotge de sorra, les diferents etapes d'un decaïment per a estudiar el pas del temps ha estat aprofitada a escala de física nuclear en la datació radioactiva. És impossible determinar quan es desintegrarà un nucli concret, però se sap que, estadísticament, una població de nuclis d'una espècie tarda sempre el mateix a decaure a la meitat, és a dir, tarda el mateix per passar de N nuclis a $N/2$ com de $N/2$ a $N/4$, de $N/4$ a $N/8$ i així successivament. Aquest temps és característic del tipus de nucli i del tipus de desintegració i s'anomena *semivida*. En el límit continu, aquest decreixement correspon a una llei exponencial que relaciona el temps amb l'activitat radioactiva d'una mostra donada.

Ja al 1905, en observar que un dels productes de desintegració del radi és l'heli (les partícules alfa de la radioactivitat), E. Rutherford suggerí que l'edat d'un mineral que contingui radi podria ser mesurada a partir de la relació entre els continguts d'heli i de radi (suposant que l'heli no abandonés el mineral) i avaluà per primer

cop l'edat d'una mostra mineral, d'uns 500 milions d'anys. S'obrien així grans possibilitats que, tot i això, foren rebudes amb escepticisme. Entre els pocs investigadors que s'hi van interessar cal destacar B. Boltwood, que cap a 1910 utilitzà la relació urani-plom i va calcular l'edat de diversos minerals, entre 400 i 2.200 milions d'anys, i A. Holmes, que dedicà la vida a estudiar amb aquests procediments l'edat de la Terra, tema sobre el qual, ja al 1913, publicà un llibre en què subratllava les grans possibilitats d'aquests mètodes sobre els més convencionals de velocitat de sedimentació o de paleontologia.

La datació radioactiva de roques utilitza principalment el decaïment d'isòtops com el ^{238}U (donant ^{206}Pb , semivida: 4.500 milions d'anys) i el ^{40}K (donant ^{40}Ar , semivida: 1.300 milions d'anys). El segon decaïment és directe, mentre que, en canvi, entre el ^{238}U i el ^{206}Pb hi ha una cascada de tretze isòtops diferents, tots radioactius. En altres ocasions s'utilitzen els decaïments de ^{235}U (donant ^{207}Pb , semivida: 710 milions d'anys) o el de ^{232}Th (donant ^{208}Pb , semivida: 14.100 milions d'anys). De fet, el plom ordinari no radioactiu és una mescla dels isòtops 204, 206, 207 i 208. Tots ells, tret del 204, s'han produït per decaïment radioactiu. Si una mostra no conté gens de plom 204, vol dir que s'ha produït per desintegració radioactiva i pot ser emprada per a la datació.

Les semivides d'aquests processos són molt llargues i, per tant, no poden distingir prou bé les diferents èpoques de la història humana, massa breu en comparació amb les semivides esmentades. Per això, disposar d'un mètode radioactiu de datació arqueològica resultà més difícil que per a avaluar les edats de les roques. El procediment del ^{14}C , ideat per W. Libby en els anys quaranta, aprofita que la semivida d'aquest isòtop val 5.730 anys, una edat comparable a les de les civilitzacions històriques, i suposa que la incorporació d'aquest isòtop a la substància orgànica s'atura amb la mort de la planta o animal en qüestió. Se suposa que en l'organisme viu, l'abundància relativa del ^{14}C respecte al ^{12}C és la mateixa que a l'atmosfera (una proporció de $1,3 \times 10^{-12}$), on és format per la col·lisió de raigs còsmics amb nuclis de nitrogen. A partir de la mort de la planta o l'animal, la quantitat de ^{14}C va disminuint exponencialment.

En l'actualitat, hi ha un gran interès per les possibles perspectives de canvi climàtic produït per l'acció humana, i es dedica molta atenció a esbrinar la història climàtica del planeta. La proporció

entre els isòtops d'oxigen ^{18}O i ^{16}O a diferents profunditats de les capes de gel dels pols és considerada un bon indicador de la temperatura del planeta, ja que en èpoques més càlides hi ha més evaporació. Com que s'evapora més ^{16}O que no pas ^{18}O , ja que el primer és més lleuger, una proporció alta de ^{18}O fa pensar en temps càlids.

3.2. EL TEMPS EN MECÀNICA

La mecànica clàssica desenvolupada inicialment per Newton suposà una visió nova del sistema solar i de les relacions entre les matemàtiques i el món. El seu poder predictiu i el determinisme que implicava foren les seves conseqüències més importants pel que fa a la visió del temps. Predictivitat i determinisme, però, han estat posats en qüestió per la teoria del caos i la mecànica quàntica, respectivament.

3.2.1. *Mecànica clàssica: determinisme i predictibilitat*

En la mecànica newtoniana, el temps és un simple paràmetre que indica una successió absolutament ordenada, però reversible, d'esdeveniments. Per això, la mecànica no acostuma a parlar de causes i efectes, sinó de cadenes d'esdeveniments, que poden ser recorregudes en un sentit o en un altre. Les equacions de la mecànica clàssica serveixen no tan sols per a explorar el futur, sinó també el passat. Per exemple, podem predir eclipsis futurs, però també podem calcular quan es produïren els eclipsis del passat. Si coneixem la posició i la velocitat inicial de totes les partícules que formen un sistema i les forces en funció de la posició, integrant les lleis de Newton analíticament o numèricament, podem determinar l'estat futur del sistema. En principi, tot queda determinat per les condicions inicials; per això, un ésser que conegués amb tota precisió les condicions inicials i pogués calcular molt ràpidament (ésser hipotètic que rep el nom de *dimoni de Laplace*) coneixeria tot el futur. Un repte conceptual és comprendre la compatibilitat entre aquest determinisme i la llibertat.

El primer gran èxit de les lleis de Newton fou l'anàlisi del moviment dels planetes en el sistema solar, tot explicant les lleis observacionals de Kepler. Altres tres èxits foren el càlcul de la periodici-

tat del cometa Halley, l'explicació de les marees i, posteriorment, a partir de les anomalies aparents en el moviment d'Urà, la predicció d'un nou planeta, Neptú, que encara no havia estat observat en l'època de Newton. El moviment dels planetes, però, presenta subtilitats que van més enllà de les lleis de Kepler. Ens limitarem a la Terra, que presenta altres ritmes que els de rotació al voltant del seu eix (dia), i al voltant del Sol (any): es tracta de la rotació del seu eix al voltant d'una línia perpendicular al pla de l'eclíptica (precessió dels equinoccis), amb una periodicitat d'uns 26.000 anys; l'oscil·lació en l'angle d'inclinació del seu eix respecte de l'eclíptica, entre 21,8 i 24,4 graus (actualment, 23,4 graus), amb un període d'uns 40.000 anys; i l'oscil·lació de l'excentricitat de l'òrbita terrestre, amb un període d'uns 93.000 anys. Aquests tres ritmes (el primer, pel caràcter no perfectament esfèric de la Terra, i els dos segons per la influència dels altres planetes, en especial de Júpiter), s'anomenen *ritmes de Milankovitch*, i determinen en part les glaciacions, pels canvis d'insolació de la Terra. La Lluna ha contribuït a estabilitzar l'amplitud de l'oscil·lació de l'eix de rotació, i ha permès la vida sobre la Terra; sense ella, les oscil·lacions haurien estat molt més grans i no hi hauria hagut vida intel·ligent.

En la natura trobem d'altres moviments periòdics, com ara les oscil·lacions dels pèndols i de les molles i d'alguns circuits electrònics, i la repetició dels batecs del cor. Malgrat el caràcter periòdic, hi ha una diferència profunda entre aquest darrer moviment i el d'un pèndol simple. En el moviment periòdic harmònic, l'amplitud depèn de les condicions inicials. En canvi, el moviment periòdic del cor està regit pel que s'anomena un *cicle límit*: es tracta d'un moviment no lineal, l'amplitud i període del qual no depenen de les condicions inicials, i que permet que el cor, després de la seva acceleració en una cursa o un ensurt, torni al seu ritme normal.

3.2.2. Mecànica clàssica no lineal: impredictibilitat i caos

No sempre és possible trobar una expressió explícita del valor de les variables del sistema en funció del temps, que permeti de predir la situació del sistema en qualsevol instant posterior o anterior, de manera que només calgui introduir en la fórmula el valor del paràmetre temps corresponent a l'instant per al qual volem fer la predicció.

Molts sistemes no són integrables, és a dir, és impossible trobar una fórmula matemàtica explícita que expressi les variables en funció del temps i cal resoldre numèricament el sistema per iteració. Això fa que, mentre que en el sistema integrable podem saltar tant de temps com vulguem per fer una predicció per a un instant llunyà, en els sistemes no integrables cal recórrer tots i cadascun dels instants entre el present i el moment per al qual volem fer la predicció. Tal com en la vida mateixa, no podem saltar dies o hores: hem d'anar-los recorrent un per un fins a arribar al punt de destinació.

Entre 1975 i 1990, la física ha viscut la revolució del caos determinista. Els sistemes caòtics són aquells la dinàmica dels quals és molt sensible a les condicions inicials. En termes tècnics, un petit error en les condicions inicials creix exponencialment amb el temps i invalida les prediccions al cap d'un cert temps. Com que no podem conèixer amb precisió infinita (és a dir, amb infinits decimals) ni la posició ni la velocitat, sempre hi ha un marge d'incertesa en les condicions inicials. En els sistemes normals, aquesta imprecisió creix de manera relativament lenta (com una potència del temps), de manera que la qualitat de la predicció decreix lentament. En canvi, en els sistemes caòtics, la imprecisió creix exponencialment i les prediccions, doncs, deixen de ser fiables al cap d'un temps molt curt. Hi ha, doncs, un horitzó de predictibilitat, de manera que determinisme i predictibilitat ja no són equivalents com en la visió clàssica.

Els estudis sobre moviments caòtics foren iniciats per H. Poincaré a finals del segle XIX, en el sistema de tres cossos que interaccionen gravitatòriament, però els seus resultats eren tan difícils que poca gent els va comprendre. La represa de l'interès en el caos se situa en els estudis d'E. Lorenz, cap al 1965, sobre les solucions d'un model matemàtic simplificat de la convecció atmosfèrica. Ruelle i Takens, el 1971, descobriren matemàticament els anomenats *atractors estranys* i formularen un marc molt general on trobaven cabuda els resultats de Lorenz. Mandelbrot proposà, el 1975, la geometria fractal, una geometria de la complexitat autosimilar, que pot descriure la forma de corbes o superfícies complicades, com ara les línies de costa, els relleus de les muntanyes o dels núvols. La bellesa de les formes fractals va seduir ràpidament un públic molt ampli i obrí una nova manera de veure els fenòmens complexos. Hom va comprovar de seguida que els atractors estranys de Ruelle i Takens

tenen estructura fractal en l'espai de fases. Es combinava així la complexitat dinàmica amb la geomètrica. Els càlculs per ordinador —instrument imprescindible en aquest camp— i els experiments se succeïren ràpidament en una àmplia diversitat de situacions: hidrodinàmica, cinètica química, electrònica, òptica, ecologia matemàtica, meteorologia, magnetisme..., i la ciència de la complexitat esdevingué una gran aventura pluridisciplinària.

Aquest és el temps de la meteorologia, de les variacions erràtiques de les posicions dels pols magnètics terrestres, o de la fibril·lació ventricular. En oposició a la la predictibilitat dels eclipsis, amb una anticipació d'anys, i fins i tot de segles, el temps meteorològic no és predictable acuradament a partir de tres o quatre dies: petites modificacions del sistema s'incrementen enormement i porten a situacions completament diferents de les predites. Ací trobem la incertesa en el futur —i la incertesa del que passà. Trobem un temps proper a la nostra experiència.

Aquesta complexitat dinàmica no és el resultat de molts graus de llibertat independents, sinó que es dona ja en sistemes amb només tres graus de llibertat, si la dinàmica és contínua, o bé, si és discreta, en sistemes d'una sola variable. Un exemple molt simple mostra com una equació força senzilla pot tenir, segons els valors dels paràmetres, comportaments diversos. Es tracta de la recurrència logística, inspirada en problemes de dinàmica de poblacions o de rèdits de capitals. En ella, el valor x_{n+1} d'una certa variable x en un instant $t_n + \tau$, està relacionada amb el valor x_n de la variable en un temps anterior t_n per la relació

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$$

amb r un paràmetre entre 0 i 4. Si r està comprès entre 0 i 1, el valor de x_n quan n tendeix a infinit tendeix a zero, és a dir, a l'extinció. Per a r entre 1 i 3, x_n tendeix a $1 - (1/r)$. Entre $r = 3$ i $r = 3,449499...$, x_n ja no tendeix a un punt fix, sinó a dos nombres que es van alternant: tenim un cicle límit de període 2. Entre $r = 3,449499...$ i $r = 3,54409...$, hi ha repetició successiva de quatre valors diferents; en $r = 3,564407...$ el cicle d'ordre 4 dona lloc a un cicle d'ordre 8, i així successivament, fins que per a $r = 3,569946...$ arribem a un comportament caòtic, és a dir, no periòdic i la successió de valors del qual és molt diferent malgrat que hom surti de condicions inicials molt poc diferents.

Tot i la incertesa que comporta, el caos té aspectes positius, ja que permet explorar moltes possibilitats. Per això, no és estrany trobar-lo en sistemes biològics com el sistema immunitari o en el cervell. El caos no es pot comprovar a partir de prediccions concretes, sinó de propietats dinàmiques i topològiques globals de les trajectòries, ja que la comparació d'una trajectòria real concreta i una trajectòria prevista no coincidiran al cap de poc temps.

3.2.3. *Mecànica quàntica*

La mecànica quàntica fou proposada, en la seva forma essencial, vers 1926, per Heisenberg, Schrödinger i Dirac, independentment. Els sistemes quàntics estan descrits per una funció d'ona que dona la probabilitat de trobar-los en certs estats en fer un experiment. Pel que fa a la interpretació del temps, la mecànica quàntica aporta les idees d'indeterminisme i els conflictes d'interpretació del procés de mesura.

Vegem, en primer lloc, l'indeterminisme. En el capítol primer hem subratllat que segons el principi d'indeterminació de Heisenberg, que se segueix de la complementarietat de les descripcions corpuscular i ondulatoria, hi ha una restricció a les precisions amb què poden ser conegudes simultàniament la posició i la quantitat de moviment. Això implica que el determinisme clàssic newtonià, que exigeix el coneixement de les condicions inicials de velocitat i posició, ja no sigui vàlid. L'indeterminisme quàntic és un dels aspectes essencials d'aquesta teoria, i trenca la visió del temps com el simple desplegament d'una realitat ja donada per les condicions inicials.

Cal distingir, però, entre l'evolució de la funció d'ona, donada per l'equació de Schrödinger, que és una equació determinista i reversible, amb el procés de mesura, que és irreversible i intrínsecament aleatori. Segons la interpretació més usual de la mecànica quàntica, el sistema, abans de ser sotmès a mesura, està simultàniament en tots els estats, i només en el moment de fer la mesura passa a estar en un estat concret. Les paradoxes d'aquesta interpretació queden subratllades per un exemple adduït per Schrödinger el 1935, d'un gat dintre d'una caixa tancada i de parets opaques, i en presència d'un mecanisme quàntic que pogués disparar un explosiu o una metzina. Com que el sistema quàntic estaria en una superpo-

sició de dos estats (activat i desactivat), el gat estaria alhora viu i mort. Només en el moment d'obrir la caixa i fer l'observació, el sistema quàntic passaria a estar en un sol estat i, corresponentment, el gat passaria a estar viu o mort.

Això resulta tan revoltant per al sentit comú que molts científics, com Einstein i Schrödinger, dos dels creadors de la mecànica quàntica, s'oposaren amb vehemència a la convicció que aquesta sigui una descripció completa de la realitat. Tot i això, experiments recents sobre aquestes qüestions, relacionats amb la polarització de fotons emesos en direccions oposades en la desexcitació d'alguns àtoms, han posat de manifest resultats compatibles amb el punt de vista de la mecànica quàntica i incompatibles amb un model local i determinista de la realitat. En particular, si no mesurem posició ni velocitat, un electró no tindria ni posició ni velocitat: seria una entitat no local que ocuparia alhora tot l'espai, i que es contreuria a un sol punt en ser-ne mesurada la posició.

El fenomen del col·lapse de la funció d'ona de què acabem de parlar és la part més conflictiva de la mecànica quàntica i no és descrit per l'equació de Schrödinger. Una formulació completa de la mecànica quàntica exigiria, probablement, aquesta descripció. Alguns autors ho atribueixen al pas d'un sistema microscòpic a un sistema macroscòpic (com per exemple els instruments de mesura); d'altres autors ho han atribuït a la intervenció de la consciència. D'altres han proposat solucions encara més curioses a aquesta qüestió: H. Everett III, el 1958, proposà el model de molts universos, segons el qual, en fer cada experiment, l'Univers es desdoblaria en dos: en un d'ells, per exemple, veuríem la partícula en un estat (el gat viu) i en un altre veuríem la partícula en un altre estat (el gat mort). Totes dues respostes serien realitzades simultàniament, però en universos diferents. El model d'Everett, des del punt de vista temporal, representaria una bifurcació (de fet, una cadena d'infinites bifurcacions!) del temps, en què es realitzarien totes les potencialitats, però no en el mateix univers, com en la frase de J. L. Borges: «El tiempo se divide siempre en innumerables futuros».

3.3. LA RELATIVITAT I EL TEMPS

La proposta de Copèrnic segons la qual la Terra gira al voltant del Sol feu passar aquesta del repòs absolut al moviment absolut. El

que semblava en repòs, resultava estar, de fet, en moviment rapidíssim. Això resultava incompatible amb la física aristotèlica, com ja ho hem dit en el capítol primer, i per això Galileu proposà una nova mecànica basada en el principi d'inèrcia. En la formulació de Galileu i de Newton, les lleis de la mecànica són iguals en dos sistemes qualssevol que es moguin amb velocitat constant i uniforme l'un respecte de l'altre: això és el que s'anomena *principi de relativitat de Galileu*. Ara bé, les equacions de Maxwell de l'electromagnetisme feren aparéixer una velocitat privilegiada: la de la llum. Era d'esperar que, si aquestes ones viatgen en un cert èter universal, fos possible de detectar el moviment relatiu de la Terra respecte de l'èter a partir de modificacions de la velocitat de la llum quan la Terra s'atansa a una estrella o se n'allunya. Els experiments de Michelson i Morley posaren de manifest que això no és així: la velocitat de la llum és la mateixa en tots dos casos. Einstein proposà una nova teoria de la relativitat, vàlida alhora per a les lleis de la mecànica i de l'electromagnetisme, que suposà una interpretació nova de l'espai i el temps. El temps i l'espai absoluts de la teoria newtoniana foren substituïts per dos altres absoluts: la velocitat de la llum i l'interval en l'espai-temps.

3.3.1. *Relativitat especial*

El 1905 Einstein formulà la teoria de la relativitat, segons la qual les lleis de la física (mecànica i electromagnetisme) són invariants per a observadors que es mouen amb velocitat uniforme l'un respecte de l'altre, i la velocitat de la llum és la mateixa per a dos observadors qualssevol i independent del moviment de l'emissor. Això té implicacions profundes sobre la manera de considerar l'espai i el temps. En efecte, el caràcter sorprenent de la segona afirmació queda posat en relleu si pensem que quan anem en un cotxe amb velocitat v i veiem que se'ns n'atansa un altre amb velocitat v' , la velocitat relativa és $v + v'$. En canvi, la relativitat einsteiniana afirma que tant si ens acostem com si ens allunyem a una font lluminosa mesurem la mateixa velocitat de la llum.

Una anàlisi quantitativa mostra que en moure's a una velocitat v hi ha una contracció en les longituds i una dilatació en els temps. Siguin Δl_p i Δt_p la longitud i el temps mesurats per un observador en repòs (anomenats usualment *longitud pròpia* i *temps propi*).

Aleshores, la longitud l i el temps t mesurats per un observador que es mou amb velocitat v respecte del primer valen

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \Delta t_p ; \Delta l = \sqrt{1 - (v/c)^2} \Delta l_p$$

on c és la velocitat de la llum. Observem que l'interval temporal és més gran o igual en l'espectador en moviment que en l'espectador en repòs: això fa que el temps passi més ràpidament per a l'observador quiet que per a l'observador en moviment. Observem que per a $v = c$ (per exemple, per a un fotó) tot seria simultani. En canvi, dos esdeveniments no situats en el mateix punt poden resultar simultanis per a un observador però no per a un altre, de manera que la simultaneïtat deixa de tenir un sentit absolut, i també el caràcter relatiu de l'ordre temporal, quan dos esdeveniments no estan causalment connectats. Observem, finalment, que la longitud s'escurça per a l'observador en moviment respecte de la longitud mesurada per l'observador en repòs. Això és corroborat, efectivament, per l'experiment de Michelson-Morley de 1887 i per molts d'altres de posteriors.

Aquestes relacions, anomenades *relacions de Lorentz-Fitzgerald* —que foren els primers a suposar una reducció de la longitud en el sentit del moviment— impliquen per a la suma de velocitat no pas la suma usual de la mecànica clàssica, sinó la relació

$$u' = \frac{u + v}{1 + uv/c^2}$$

Aquesta relació es redueix a l'habitual si la velocitat de la llum tendeix a infinit. Observem que si una d'aquestes velocitats (per exemple u) és igual a c , aleshores u' també és c , sigui quina sigui la velocitat v entre els observadors, de manera que la velocitat c és, efectivament, igual per a tots els observadors.

Aquestes relacions sorprenents han estat confirmades moltes vegades. La primera fou als anys quaranta, pel ritme de desintegració dels muons produïts per raigs còsmics en l'atmosfera. Aquests avancen amb velocitats molt grans, però malgrat això, segons la teoria clàssica, no podrien arribar a la superfície de la Terra ja que el seu temps de desintegració és molt curt. Hi arriben perquè el temps propi de desintegració s'allarga respecte del temps mesurat per no-

saltres. Una altra comprovació, de 1970, es basà en rellotges atòmics situats en avions ultrasònics al voltant de la Terra; aquesta comprovació és delicada pel fet que cal incloure les modificacions degudes a la gravetat, i que les modificacions temporals són petites, pel valor petit de la velocitat de l'avió en comparació amb la velocitat de la llum. Els efectes relativistes també són comprovats per les freqüències de les línies d'emissió dels àtoms d'un gas molt calent, en el qual les molècules es mouen amb gran velocitat, i en el comportament que manifesten les partícules en els grans acceleradors.

Les transformacions esmentades són simètriques per als dos espectadors implicats. Això suposa certes paradoxes, com la ben coneguda paradoxa dels bessons: si un observador fa un viatge amb velocitat elevada, quan torna, troba més vells els que s'han quedat que no pas ell. Per exemple, si viatja fins a una estrella distant vuit anys llum de la Terra, amb una velocitat $v = 0,8c$, aleshores, el temps que tarda a anar i tornar segons l'observador de la Terra és vint anys (deu d'anar i deu de tornar) mentre que per a l'observador en moviment només tarda dotze anys (sis per anar i sis per tornar). Per tant, quan arriba a la Terra troba que l'observador terrestre ha envellit vint anys, en lloc dels dotze que ha envellit ell. La paradoxa rau en el fet que la velocitat d'ambdós és relativa i, per tant, si considerem com a observador en moviment el de la Terra i l'altre en repòs, la situació hauria de ser la inversa. La resolució rau, segons es creu, en el fet que l'observador en moviment ha sofert una acceleració i un frenament, cosa que trenca la simetria entre ambdós observadors. Això, però, introdueix una asimetria entre espai i temps, ja que la longitud del metre de l'observador en moviment no resta afectat per les acceleracions mentre que sí en resta afectat el temps.

Observem que aquestes equacions impliquen que la velocitat de la llum, a més d'una constant, representa un valor màxim per a les velocitats que hom pugui atènyer. La massa augmenta amb la velocitat, de manera que un objecte que tingui massa no pot arribar a la velocitat de la llum, ja que caldria una energia infinita per a accelerar-lo fins a aquella velocitat. De totes maneres, hom ha imaginat que hi podria haver partícules més ràpides que la llum (taquions) les quals no podrien frenar-se a velocitats més petites que les de la llum. El tema de la velocitat màxima de propagació ha despertat recentment molt d'interès. Cal distingir, en aquestes anàlisis, la velocitat de fase (corresponent a una ona de freqüència donada)

d'altres velocitats que es presenten quan es propaguen simultàniament ones de diverses freqüències, la suma de les quals forma uns paquets d'ones. El màxim del paquet es propaga amb la velocitat de grup; també tenen interès la velocitat del senyal a mitja altura del paquet i la de l'energia continguda en una certa fracció del paquet. En medis excitats metaestables (per exemple, amb inversió de població atòmica), la velocitat de grup, dels senyals i de l'energia poden superar la velocitat de la llum en el buit, perquè la part anterior del paquet absorbeix energia dels medi i modifica la forma del paquet, de manera que el màxim avança més ràpidament que la mitjana. Això, però, no viola la causalitat, perquè l'energia i la informació no es propaguen més ràpid que la llum, sinó que ja eren contingudes prèviament en el medi.

3.3.2. *Relativitat general*

La teoria general de la relativitat és una extensió de la teoria especial que inclou espectadors accelerats i camps gravitatoris. El 1915, Einstein formulà el principi d'equivalència entre gravitació i sistemes accelerats, segons el qual un espectador que observés una força sistemàtica sobre tots els objectes que el volten no podria distingir si aquesta força és perquè el sistema està uniformement accelerat o perquè està sotmès a un camp gravitatori. Aquesta equivalència explicaria la igualtat de massa inercial (és a dir, la resistència als canvis de velocitat) i massa gravitatòria (la causant del pes), que en la física clàssica sembla una coincidència. Per formular la teoria general, Einstein relacionà la mètrica de l'espai-temps amb el contingut de massa o energia.

Segons aquesta teoria, la gravetat afecta el ritme dels rellotges; tal com una acceleració fa passar d'una velocitat petita a una de gran i, per tant, fa que els rellotges vagin cada vegada més lentament, també la gravetat alentiria el ritme dels rellotges. Per exemple, en el cim de l'Everest, el temps va unes trenta milionèsimes de segon (per cada segon) més lent que no pas al nivell del mar. En l'horitzó dels forats negres la gravetat és tan intensa que no deixa sortir ni els fotons i el temps s'atura per a un observador distant (no per a un observador proper). Així, si un astronauta està a punt de travessar l'horitzó d'un forat negre, ell no percep cap canvi en el rellotge. En canvi, un observador distant (és a dir, no sotmès a la

gravetat) veu que, a mesura que l'astronauta s'acosta a l'horitzó del forat negre el temps passa més lentament, fins que en el moment que el travessa li sembla veure l'astronauta immòbil en l'horitzó i amb el rellotge aturat.

La física relativista és tan determinista com la clàssica, de manera que tot el futur de l'Univers ja estaria contingut en les condicions inicials. Aquest caràcter queda visualitzat amb més claredat que en la física clàssica, ja que la relativitat treballa amb l'espai-temps. Si aquesta és una realitat donada, el temps no és un flux, sinó una mena de tapís quadridimensional en què l'existència queda representada per una línia de món, una mena de fil que comença i acaba. El temps és un paràmetre que especifica la posició en el fil, però el fil mateix és intemporal.

3.3.3. *Viatges en el temps*

La gravitació consisteix en una deformació de l'espai-temps causada pel seu contingut de massa o energia. En principi, és concebible que aquesta deformació sigui tan intensa que s'hi produeixin bucles tancats, que poden ser de tipus temps al llarg de tot el seu recorregut, i que localment exhibirien totes les propietats que ens són familiars, però que serien corredors vers el passat. Si seguíssim aquesta corba de tipus temps tancada, ens precipitaríem vers el nostre jo del passat i aquest ens substituiria, però si només ens recorreguéssim una part tornariem al passat. K. Gödel trobà una solució de les equacions d'Einstein amb corbes tipus temps tancades. També podria haver-n'hi prop de forats negres en rotació. J. Wheeler anomenà *forats de cuc* a forats que connecten diferents parts de l'espai-temps, els quals poden donar lloc a una corba temporal tancada. Una corda còsmica que travessés ràpidament una altra podria produir aquestes corbes.

La possibilitat de retorn al passat obre moltes paradoxes, com ara la de la possibilitat de matar els propis pares abans de ser engendrat. En la teoria clàssica aquestes paradoxes són inevitables, i per això molts s'hi han oposat, però no en la teoria quàntica de molts mons proposada per H. Everett el 1957.

3.4. COSMOLOGIA: L'INICI I LA FI DEL TEMPS

Una de les aportacions més sorprenents de la ciència moderna a la cultura ha estat la de fer saber que l'Univers es troba en expansió, en lloc de ser estàtic, com sempre havia estat considerat. En aquesta secció, dedicada al temps cosmològic, examinarem tres qüestions: l'origen del temps i l'edat de l'Univers; la cronologia dels esdeveniments principals en l'evolució de l'Univers, i la fi de l'Univers.

3.4.1. *L'origen del temps i l'edat de l'Univers*

El 1916, Einstein aplicà les equacions de la relativitat general a la descripció de l'Univers i arribà a la conclusió que aquest no podia ser estàtic. Hubble descobrí, el 1929, l'allunyament sistemàtic de les galàxies, amb una velocitat proporcional a la separació entre elles, que revela una expansió de l'Univers. La velocitat d'allunyament de dues galàxies qualssevol pot ser expressada com $v = Hr$, on r és la distància entre elles i H és la «constant» de Hubble (que no depèn de les galàxies però sí del temps). En extrapolar vers el passat aquest moviment d'expansió, arriba un instant en què totes les galàxies coincidirien, moment que podríem interpretar com l'origen de l'Univers, l'edat del qual valdria, doncs, aproximadament, $1/H$. Segons això, l'Univers tindria una edat finita que podria ser esbrinada observacionalment. La imprecisió amb què es coneix la constant de Hubble és gran, i situa l'edat de l'Univers entre 9.000 i 14.000 milions d'anys.

L'expansió de l'Univers no exclou necessàriament un univers etern. Per exemple, el model d'univers en estat estacionari, proposat per Hoyle, Bondi i d'altres, suposava que a mesura que procedeix l'expansió es va creant matèria de manera que la densitat de l'Univers roman constant. El ritme de creació necessari per a això és molt baix, d'un àtom d'hidrogen per quilòmetre cúbic i per any, de manera que, a efectes pràctics, seria inobservable. Aquest model topà amb dificultats aparentment insalvables quan fou descoberta la radiació de fons de microones i l'abundància de quàsars a gran distància.

Altres autors proposen la presència de «forats blancs», o fonts intensíssimes i puntuals de creació ocasional de matèria, en oposició a la creació contínua i homogènia dels models d'estat estacionari o de la creació limitada a l'instant inicial. Així, la gran explosió inicial vindria acompanyada de petites explosions creadores locals.

La cursa cap a la comprensió de l'instant inicial es veu interrompuda per una barrera a partir de la qual no tenim accés per manca d'una teoria quàntica de la gravitació. Aquesta barrera correspon al temps i la longitud de Planck, de què ja hem parlat en el capítol primer, i que valen 10^{-43} segons i 10^{-23} centímetres respectivament. Pot ser que una teoria unificada definitiva permeti creuar aquesta barrera; en algunes teories de gravitació quàntica, com la de Hawking, el temps prop de l'origen sembla tornar-se com l'espai i la singularitat inicial del Big Bang desapareix.

Una altra pregunta referent a l'origen és què hi havia abans del Big Bang. En la teoria clàssica, aquesta qüestió no té sentit: el temps comença juntament amb l'espai i la matèria i no hi ha un abans. En canvi, en la física quàntica és possible un espai-temps indefinit en el qual es van produint universos com a fluctuacions quàntiques, potser amb valors diversos i aleatoris de les seves constants físiques.

3.4.2. *L'evolució de l'Univers*

La cosmologia moderna dóna una imatge de com s'ha format i ha evolucionat la matèria. En el model estàndard, l'inici de l'Univers seria una singularitat caracteritzada per una temperatura i una densitat infinites. A mesura que la temperatura de l'Univers va davallant, per l'expansió, el seu contingut material va canviant. La connexió entre els continguts de l'Univers i la seva evolució fa confluïr la física de partícules elementals i la cosmologia de manera natural i molt atractiva.

Vegem molt breument les etapes principals de la història tèrmica de l'Univers, abans d'examinar-les amb més detall. Abans d'iniciar aquesta cronologia, però, cal dir que l'assignació de temps és força indirecta i es basa en tres hipòtesis. La primera suposa que l'Univers està constituït per radiació que s'expandeix adiabàticament i reversiblement. Segons la termodinàmica això implica que el producte de la temperatura absoluta pel radi de l'Univers és constant. Aquesta relació entre el radi i la temperatura permet conèixer la densitat d'energia en funció del radi que, introduïda en les equacions d'Einstein, dóna el radi en funció del temps i, per tant, la temperatura en funció del temps. Això porta, mentre l'Univers està dominat per la radiació, que la temperatura disminueix de manera inversament proporcional a l'arrel quadrada del

El temps i la memòria en la ciència contemporània

temps. Finalment, utilitzem la interpretació de la temperatura absoluta com una mesura de l'energia cinètica translacional mitjana de les partícules. Així, s'assigna a cada energia un temps, de manera que a mesura que podem anar explorant col·lisions a energia més alta, amb acceleradors cada vegada més potents, tenim accés a temps més breus.

Les etapes principals que examinarem són:

a) Inicialment, el contingut de l'Univers degué ésser una mescla de radiació i de partícules de tota mena de masses. En seguir-se refredant l'Univers, els quarks s'agruparen de tres en tres o de dos en dos per donar lloc als hadrons.

b) En reduir-se encara més la temperatura, la majoria d'hadrons anaren desapareixent i quedaren els de vida més llarga (protons, neutrons), els quals s'anaren agrupant per donar lloc als nuclis més lleugers (hidrogen, deuteri, heli, liti).

c) En seguir el refredament i arribar a uns 3.000 K, els electrons i els nuclis positius anaren formant àtoms neutres. A partir d'aquest moment, la radiació deixà d'actuar sobre la matèria i es començaren a formar les galàxies.

d) Es formaren les estrelles, en el si de les quals s'anaren produint nuclis cada vegada més pesants. En explotar la primera generació d'estrelles (grans i de vida curta), llençaren a l'espai aquests nuclis, que permeteren que algunes de les de la segona generació poguessin estar acompanyades de planetes compostos per elements pesants.

TAULA 4. Història tèrmica de l'Univers.

<i>Edat</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Contingut</i>
10^{-12} s	10^{15} K	Els quarks es combinen per donar hadrons
10^{-6} s	10^{11} K	Protons i antiprotons s'aniquilen
10^{-4} s	10^{10} K	Anihilació d'electrons i antielectrons. Comença la nucleosíntesi primordial
3 min	10^6 K	Acaba la nucleosíntesi primordial (heli 4, liti, deuteri, heli 3)
300.000 anys	3.000 K	Formació dels àtoms: els protons capturen els electrons i formen àtoms neutres d'hidrogen
10.000.000 anys	300 K	Formació de les galàxies

Descrivim amb una mica més de detall les tres primeres etapes:

a) Formació d'hadrons

Per sota de 10^{15} K, els quarks tendeixen a agrupar-se de tres en tres o de dos en dos tot donant lloc a hadrons (barions o mesons, respectivament). Aquests s'anaren desintegrant fins a quedar els nucleons més estables, el protó i el neutró, que té una vida mitjana d'uns divuit minuts fora del nucli i una vida molt més llarga, pràcticament infinita, en l'interior del nucli. Mentre la temperatura és prou elevada, hi ha equilibri entre protons i neutrons segons una sèrie de reaccions nuclears ($p \rightarrow n + e^+ + \nu$, $n \rightarrow p + e^- + \text{antiv}$, $p + e^- \rightarrow n + \nu$) que fan que els neutrons que es desintegren siguin refets a partir de protons.

b) Formació de nuclis lleugers

Per sota de 10^{14} K, hi ha una anihilació colossal d'electrons i positrons i les reaccions que mantenien en equilibri protons i neutrons deixen d'actuar. Ara, l'energia mitjana dels fotons, proporcional a la temperatura absoluta T , és menor que la necessària per formar una parella electró-positró. Donada la dràstica reducció en el nombre d'electrons (i la desaparició total dels positrons) els neutrons que es desintegren ja no poden ser substituïts i la seva sola possibilitat de supervivència és combinar-se amb els protons per donar nuclis lleugers. Donada la gran inestabilitat del deuteri, això només és possible quan la temperatura disminueix per sota de l'energia de desintegració d'aquest nucli.

Segons la mecànica estadística clàssica, aquesta temperatura duu a una proporció ben definida de neutrons i protons, en concret, set protons per cada neutró. Si suposem que pràcticament tots els neutrons es combinen amb protons, arribem a una proporció, en massa, del setanta-cinc per cent d'hidrogen i gairebé el vint-i-cinc per cent d'heli 4 (constituït per dos protons i dos neutrons), i una petita proporció d'altres nuclis lleugers, com heli 3 i liti. Aquestes prediccions del model del Big Bang concorden amb les dades observacionals i constitueixen un dels arguments a favor d'aquest model d'origen de l'Univers.

c) La formació de les galàxies

Entre els tres minuts i els tres-cents mil anys, l'Univers està format majoritàriament per nuclis positius d'hidrogen i d'heli 4, electrons, neutrinos i una gran quantitat de fotons. Els electrons i les partícules positives no estan lligats entre si, ja que les energies són molt superiors a la de ionització. Durant aquest temps, l'Univers es va expandint i refredant sense que s'esdevingui res de notable. Quan l'Univers arriba als 3.000 graus Kelvin, aproximadament en atènyer els tres-cents mil anys d'edat, els electrons queden lligats als nuclis positius per donar lloc a àtoms neutres i els fotons deixen d'interactuar amb la matèria. A partir d'ara, la radiació i la matèria aniran seguint les seves evolucions per separat: la primera s'anirà refredant i avui constitueix una radiació de fons de microones, a 2,7 K de temperatura. Ja no sotmesa a l'escombrat intensísim de la pressió de radiació, la matèria s'anirà agrupant sota l'acció de la gravitació. Així començà la formació de les galàxies, que inicialment foren grans núvols de gas en el si dels quals s'anaren formant les estrelles.

Crida l'atenció el contrast entre la gran precisió de la taula de les dates principals de la història tèrmica (milmilionèsimes de segon) i l'enorme imprecisió en l'edat (milers de milions d'anys). Els instants inicials de l'Univers poden ser estudiats amb molta precisió però no sabem ben bé quan va ser l'origen, situació semblant a la que tindriem si sabéssim amb tot detall el procés de com s'aturarà un tren, però ignoréssim a quina hora arribarà a l'estació.

3.4.3. *La fi de l'Univers*

El destí a llarg termini de l'Univers depèn de la seva densitat de matèria, ja que l'atracció gravitatòria en frena l'expansió. Aquesta atracció és més intensa si la densitat és més gran i, per tant, el frenament de l'expansió serà més ràpid. Així, l'Univers, o bé se seguirà expandint indefinidament, si la densitat és inferior a un cert valor crític (uns tres nuclis d'hidrogen per metre cúbic) o bé, si és superior, arribarà a un radi màxim i es tornarà a col·lapsar. En el primer cas el futur és il·limitat, tot i que, en refredar-se molt, l'Univers no permetrà cap mena de vida intel·ligent. Si bé la densitat deguda a les partícules que coneixem és bastant més petita que aquesta densitat

crítica i, per tant, sembla que l'Univers s'expandirà indefinidament, ignorem el valor de la contribució de la hipotètica matèria fosca i, per això, no sabem quina d'aquestes dues perspectives seguirà l'evolució de l'Univers. Dades recents semblen indicar, de manera força sorprenent, que l'expansió s'accelera en lloc de frenar-se, potser per la presència d'alguna matèria que es repel·leix en lloc d'atreure's.

En l'Univers que es torna a contreure, el temps està limitat en el futur. És possible que quan s'hagués col·lapsat del tot, sorgís un nou univers. Podríem, així, tenir un temps cíclic, si el nou Univers tingués les mateixes constants físiques que l'anterior, o bé una situació completament nova, si les constants tinguessin valors diferents.

3.4.4. *Temps i informació*

L'Univers té uns quinze mil milions d'anys. S'ha utilitzat sovint la metàfora que si dediquéssim un volum a cada mil milions d'anys, en podríem descriure la història en quinze volums i que la vida només ocuparia les dues o tres darreres línies del darrer volum. Aquesta visió lineal del temps pot veure's canviada radicalment si tenim en compte la informació que cal escriure. Així, la que cal per descriure els tres primer minuts de l'Univers és molt superior a la necessària per descriure l'etapa que va des dels tres minuts als tres-cents mil anys, ja que en els tres primers minuts s'esdevenen molts processos (ruptura de simetries entre les interaccions fortes, febles i electromagnètiques, anihilacions de protons i antiprotons, d'electrons i antielectrons, reaccions nuclears entre protons i neutrons...), mentre que en el segon interval esmentat només hi ha expansió i refredament, sense cap esdeveniment rellevant. Així, si tinguéssim en compte la quantitat d'informació necessària, la història de la vida ocuparia, probablement, més de la meitat d'aquests volums hipotètics, ja que implica una enorme quantitat d'informació (com a mínim la referida a la formació de les primeres molècules amb capacitat d'autoreproducció, l'origen del codi genètic, la formació de les primeres cèl·lules, el mecanisme de l'evolució, la formació de les neurones i del cervell...).

La situació és semblant a la que trobem en un àlbum familiar de fotografies: hi ha moments que per la seva intensitat especial mereixen moltes fotografies i d'altres que, per la seva monotonia, no són mai retratats. Si descrivim el temps segons el rellotge, tots els

instants són iguals; si els referim a la nostra experiència vital, veiem uns instants plens i uns instants buits. Podríem aplicar un criteri semblant a la mesura de l'espai si el valoréssim no segons els metres cúbics, sinó segons la informació necessària per descriure'l. Si fos així, la Terra ocuparia en aquest «espai» un volum molt més gran que el del Sol. Això ens fa veure que segons quin concepte tinguem del temps o de l'espai, la visió que tinguem del nostre lloc relatiu en el cosmos pot ser molt diversa.

3.5. TERMODINÀMICA: LA FLETXA DEL TEMPS

Passem marxa enrere una pel·lícula. Quins criteris pot tenir un espectador per saber si marxa realment cap endavant o cap endarrere? Les equacions bàsiques de la física microscòpica són invariants per inversió temporal, és a dir, no distingeixen entre anar endavant i endarrere. En canvi, en la física macroscòpica estem acostumats a processos que sempre tenen lloc en una mateixa direcció (dos cossos a temperatures diferents tendeixen a igualar la seva temperatura, però no a la inversa; els vasos tendeixen a trencar-se quan cauen, però no es recomponen espontàniament ni tornen a saltar sobre la taula).

El concepte de fletxa del temps fou introduït per Eddington, en l'obra *The nature of the physical world* (1940). Mentre l'Univers es va expandint, la temperatura de l'Univers (decreixent) o la seva complexitat (creixent) estableixen una fletxa del temps global, que permet ordenar els esdeveniments. Hi ha, però, altres fletxes del temps. La més important i evident és la fixada per la termodinàmica, tot i que la física estableix també dues altres fletxes del temps, l'electromagnètica (l'emissió d'ones esfèriques per una partícula puntual és molt més probable que no pas l'absorció d'ones esfèriques) i la microfísica (lligada amb la ruptura de la simetria per inversió temporal en la desintegració dels kaons neutres, de què hem parlat en el primer capítol), en les quals no aprofundirem en aquest text.

3.5.1. Entropia i degradació de l'energia

La termodinàmica és la part de la física que estudia les relacions entre calor i treball o, més en general, les transformacions energèti-

ques, i que descriu les propietats macroscòpiques dels sistemes i com varien amb la temperatura. La termodinàmica està basada en dues lleis fonamentals, la primera de les quals és la conservació de l'energia. Ara bé, malgrat la conservació, l'energia no s'intercanvia en qualsevol sentit: en un sistema aïllat, per exemple, la calor només pot anar d'objectes calents a objectes freds. Anàlogament, hom pot transformar íntegrament treball en calor, però no calor en treball. Aquestes dues observacions constituïren els primer enunciat de la segona llei de la termodinàmica, formulats respectivament per R. Clausius i W. Thomson, Lord Kelvin, el 1850. Tots dos fan notar que l'energia, tot i conservar-se en quantitat, va degradant-se en qualitat. Així, per exemple, si tenim una font tèrmica calenta i una de freda, en podem extreure una certa quantitat de calor i utilitzar-la per a fer funcionar una màquina tèrmica. Ara bé, si dues fonts es troben a la mateixa temperatura no podem extreure'n treball.

La idea de degradació de l'energia és essencial per comprendre què volem dir amb crisi energètica. Si l'energia es conserva, no tindria sentit parlar de crisi energètica. Ara bé, el problema rau en què, malgrat que la situació final després del consum d'uns combustibles té la mateixa energia que al principi, l'energia està en una forma menys utilitzable, repartida més homogèniament entre els diversos constituents del sistema.

La segona llei rebé una formulació quantitativa mitjançant la llei de l'increment de l'entropia, definida per Clausius el 1865, a partir del quocient entre els intercanvis de calor i les temperatures (absolutes) de les fonts amb què la calor s'intercanvia. Aquesta magnitud només pot augmentar o romandre constant, però no disminuir, i dóna un sentit a la fletxa del temps. Com més gran és l'increment d'entropia, més notable és la degradació de l'energia: l'energia desaproveitada és igual al producte de la temperatura més baixa del sistema multiplicada per l'augment de l'entropia.

L'entropia té un estatus lògic semblant al de l'energia: és una magnitud numèrica, funció d'estat, que serveix per a ordenar sèries d'esdeveniments i fixar així una fletxa del temps. Com que l'entropia no roman constant, sinó que augmenta, no hi ha hagut gaires temptacions de substantivitzar-la, a diferència de l'energia. No per això la irreversibilitat descrita per l'augment de l'entropia influí menys en la imaginació dels científics. Per a alguns, la segona llei duia de manera ineluctable a una mort tèrmica de l'Univers en què,

homogènia ja la temperatura, no hi hauria cap possibilitat d'extreure'n treball útil.

3.5.2. *Entropia i desordre: dos debats*

Un altre pas important en la interpretació de l'entropia fou la seva identificació en termes del desordre molecular per Ludwig Boltzmann, el 1872. Així, per exemple, un cristall, en què les partícules formen una estructura molt ordenada, té baixa entropia, mentre que un gas, en què les molècules estan repartides a l'atzar, té entropia elevada. Els estats d'equilibri, els de màxima entropia possible en un sistema aïllat, serien els més desordenats. La mesura del desordre es fa a través del nombre de microestats (és a dir, de configuracions microscòpiques del conjunt de molècules) compatibles amb un macroestat determinat del sistema (caracteritzat per uns pocs paràmetres macroscòpics).

La interpretació microscòpica de l'entropia obrí pas a dos debats conceptualment importants: per què les estructures vives tendeixen a l'ordre, i com fer compatible la irreversibilitat del temps termodinàmic amb la reversibilitat del temps microscòpic. Simbòlicament, podríem referir aquestes dues qüestions com Boltzmann contra Darwin, i Boltzmann contra Newton. A aquests debats cal afegir les discussions dels energetistes contra l'atomisme, tot intentant imposar un positivisme que prescindia dels àtoms com a elements no observables i, per tant, innecessaris i il·legítims teòricament. Potser com a conseqüència de les depressions en què el sumiren aquestes lluites, Boltzmann acabà suïcidant-se, a Duino, lloc d'estiueig dels vienesos a la costa adriàtica, prop de Trieste, el 5 de setembre de 1906. A continuació considerarem aquests dos debats.

3.5.2.1. Boltzmann i Darwin: entropia, estructura, vida

L'afirmació termodinàmica d'un increment del desordre, gairebé contemporània de la formulació de la teoria de l'evolució, contrastava amb aquesta, que constata que l'estructura i l'ordre dels sistemes vius creix amb el temps. Aquesta aparent discrepància fou tinguda en una certa època com una constatació que els sistemes vius no obeeixen les lleis de la física. La degradació de l'energia sem-

blava implicar una degradació de l'estructura i negar les possibilitats de vida. Posteriorment s'entengué millor que els sistemes físics poden incrementar la seva ordenació molecular si, en lloc d'estar aïllats, estan oberts, i produeixen en l'exterior un increment d'entropia prou gran com per contrarestar la disminució d'entropia del seu interior. Això és el que passa amb els éssers vius: consumeixen aliments compostos per molècules llargues i excreten aliments de cadenes curtes, cosa que produeix un increment d'entropia en el medi que permet que disminueixi la de l'individu.

Més recentment, cap a finals dels anys seixanta, s'han començat a comprendre alguns dels detalls de com es pot generar ordre en sistemes prou allunyats de l'equilibri. Els treballs de Turing sobre morfogènesi en sistemes bioquímics, els de Prigogine sobre termodinàmica de processos irreversibles i estructures dissipatives, o els de Haken sobre la sinèrgica, o comportament autoorganitzatiu de sistemes lluny de l'equilibri, han suposat progressos molt importants en aquesta línia. Prigogine ha explorat amb eloqüència aquesta faceta creadora del temps en els sistemes allunyats de l'equilibri.

La idea essencial és la competició entre un factor estructurador (per exemple, una reacció química autocatalítica, que fa que com més gran és la concentració d'una certa espècie molecular més gran en sigui el ritme de producció), el qual tendeix a incrementar les inhomogeneïtats, i un factor homogeneïtzador (com ara la difusió, que fa que les molècules tinguin tendència a passar de les zones de concentració més gran a les de concentració més petita, tot tendint així a igualar el valor de les concentracions arreu del sistema). Lluny de l'equilibri, el factor estructurador supera el factor estabilitzador, i el sistema pot ordenar-se espontàniament en estructures espacials que poden presentar també ritmes temporals propis.

3.5.2.2. Boltzmann i Newton. Temps irreversible i temps reversible

Quan Boltzmann demostrà el teorema H (o teorema del creixement d'una versió microscòpica de l'entropia) a partir de l'equació d'evolució per a la funció de distribució de les velocitats moleculars, cregué, al principi, que havia demostrat la irreversibilitat a partir de la mecànica. La il·lusió de Boltzmann durà poc: J. Loschmidt féu notar el 1876 que era impossible obtenir per mètodes basats en la mecànica una equació irreversible, ja que si hom invertís

les velocitats de totes les molècules, tornariem a la situació inicial, en contra del que passa en el procés de difusió o d'igualació de les temperatures de dos sistemes en termodinàmica. Boltzmann hagué d'admetre que una hipòtesi estadística de la seva equació era la que havia trencat la simetria temporal. A principis de segle, E. Zermelo plantejà una altra paradoxa, basada en el teorema de recurrència de Poincaré, que estableix que en un sistema finit amb energia finita, les partícules tornaran tard o d'hora a ocupar una posició tan propera a la situació inicial que hom vulgui, cosa que suposa un comportament cíclic. Hom utilitzà repetidament aquestes paradoxes per a rebatre la hipòtesi atomística.

Posteriorment, hom ha considerat que la realitat és la reversibilitat microscòpica i que la irreversibilitat macroscòpica és una il·lusió estadística. Prigogine, darrerament, a partir del comportament de sistemes caòtics, ha defensat el punt de vista oposat: la reversibilitat microscòpica és, malgrat el caràcter reversible de les equacions mecàniques, una il·lusió, tant perquè a la pràctica gairebé tots els sistemes presenten fricció irreversible (fins i tot el buit quàntic, en alguns aspectes) com perquè en els sistemes caòtics, un cop ha estat depassat l'horitzó de predictibilitat, no podem recuperar les condicions inicials.

3.5.3. *El temps en economia i ecologia: potència i rendiment*

Un dels resultats més importants de la termodinàmica es refereix al rendiment màxim de les màquines tèrmiques. Definim el rendiment d'una màquina tèrmica cíclica com el quocient entre el treball produït per la màquina i la calor subministrada. Doncs bé: si la temperatura absoluta a la qual subministrem calor a la màquina val T_1 i la temperatura a la qual n'extraïem calor (és a dir, la del refrigerant) val T_2 , el rendiment màxim que pot assolir qualsevol màquina tèrmica que treballi entre aquestes temperatures és igual o inferior al valor η (Carnot) $= 1 - (T_2/T_1)$. Aquest resultat, obtingut per Sadi Carnot el 1824, és un dels punts de partida de la termodinàmica. Segons això, si una màquina absorbeix calor a una temperatura de 127°C ($= 400\text{ K}$) i cedeix calor a 27°C ($= 300\text{ K}$), el màxim rendiment assolible és η (Carnot) $= 1 - (300/400) = 25\%$. Cap millora tècnica no pot fer que el rendiment de la màquina sigui superior a aquest valor. Per a augmentar-ne el rendiment, cal augmentar T_1 i disminuir T_2 tant com sigui possible.

Ara bé, la màquina de Carnot reversible, que té rendiment màxim, té potència nul·la perquè per tal que un procés termodinàmic sigui reversible cal que procedeixi amb velocitat pràcticament nul·la. Tota diferència finita de temperatures, tota velocitat finita de la màquina, produeix irreversibilitat i en redueix el rendiment. Així, tot i el seu interès, el resultat de Carnot té el problema de no fer intervenir el temps, mentre que a la pràctica, cal servir les necessitats energètiques en un temps finit i, per tant, cal que la màquina funcioni amb una velocitat finita.

Un resultat relativament recent porta a la conclusió que el rendiment d'una màquina tèrmica que treballa entre les temperatures T_1 i T_2 a la potència màxima és η (màxima potència) $= 1 - \sqrt{T_2/T_1}$. Aquest resultat no és tan general com el de Carnot; tot i això, és prou interessant. En el cas considerat anteriorment, en què $T_2 = 300$ K i $T_1 = 400$ K, el rendiment a màxima potència val η (màxima potència) $= 14$ %, que és inferior al rendiment del 25 % que hauria tingut la màquina reversible de potència nul·la.

Per subratllar l'interès d'aquest resultat, imaginem com una central tèrmica que treballa amb un rendiment del tretze per cent entre les temperatures esmentades seria jutjada per una persona que només conegués el resultat de Carnot i per una que conegués també el resultat esmentat. Per a la primera, la central tindria un rendiment molt baix en comparació amb el vint-i-cinc per cent assolible segons Carnot, i la jutjaria negativament. En canvi, un tècnic que conegués el resultat esmentat, no compararia el rendiment real de la central amb el de Carnot, sinó amb el rendiment corresponent a la situació de màxima potència, que és, com hem vist, del catorze per cent. Aquest tècnic conclouria que el rendiment del tretze per cent és força proper al de màxima potència, i jutjaria favorablement la central. Així, per poder jutjar amb equanimitat el rendiment d'una central no són suficients els arguments de la termodinàmica d'equilibri, sinó que cal tenir en compte també elements cinètics que tenen en consideració el temps i la potència.

Els resultats termodinàmics esmentats inviten a plantejar el problema del valor del temps en economia i en ecologia. En aquesta, interessa maximitzar el rendiment, és a dir, aprofitar al màxim totes les virtualitats del combustible i minimitzar els residus, però això implica un procés molt lent, o sigui, que el temps tingui valor nul. En economia, interessa maximitzar la potència, és a dir, fer el màxim de treball en el mínim de temps i, per això, donar un valor

màxim al temps. La situació esmentada no es presenta només en el camp de l'economia, sinó també en el de la biologia. Per exemple, un organisme en repòs pot intentar maximitzar el rendiment: per ell, el temps no té gaire valor. En canvi, per a un organisme que intenta caçar o bé fugir d'un predador, interessarà molt més aconseguir una potència màxima, a qualsevol preu. Veiem, doncs, com per a un mateix individu, el valor relatiu del temps pot variar segons les circumstàncies.

Cal observar que la nostra definició de rendiment és purament física. Des del punt de vista econòmic, caldria definir-lo com el quocient entre el treball produït multiplicat pel preu a què es ven, dividit per la calor subministrada multiplicada pel preu que cal pagar per ella. En definitiva, el problema d'harmonitzar criteris ecològics i econòmics resulta complex. Ignorar els factors de no-equilibri (la disminució del rendiment amb l'increment de potència) impedeix poder tractar aquest problema.

3.6. CONCLUSIONS

Les imatges científiques del temps (determinisme, relativitat, origen i final, reversibilitat) no resulten absolutament noves, sinó que evoquen intuïcions o interpretacions prèvies dels filòsofs i els teòlegs. Vegem, primer, els debats teològics sobre el determinisme, sobre la idea d'un temps ja escrit, determinat des de l'inici, o bé un temps obert, escrit a cada instant per la llibertat. Un déu omniscient hauria de saber si l'humà pecarà o no, i si serà predestinat a l'infern o al cel. La tensió entre l'omnisciència de Déu i la llibertat de l'home ha constituït no pas un debat acadèmic, sinó una font d'angoixes o d'alliberaments al llarg de la història del cristianisme. La predestinació imaginada per sant Agustí, o per Luter i Calví, troba una mena de ressonància laica i científista en el determinisme a ultrança de Laplace.

El determinisme de la física clàssica ha estat atacat des de dues bandes: per la mecànica quàntica, que revela un món microscòpic irreductiblement indeterminista (tret que el món sigui no local) i per la teoria del caos que, si bé no nega el determinisme, en limita considerablement la relació amb la predictibilitat. La relació entre aquests conceptes i la llibertat i responsabilitat humanes no sembla immediata, però alguns autors han imaginat que la llibertat podria venir de

l'indeterminisme quàntic manifestat a escala de neurotransmissors en el cervell. Cal recordar, però, que la llibertat està tan allunyada del determinisme com de la pura aleatorietat i que, per tant, aquesta interpretació, atractiva en alguns aspectes, no resulta completament satisfactòria. D'altra banda, determinisme i impredictibilitat constitueixen dos límits a la responsabilitat: un individu no és responsable dels seus actes si està determinat a fer-los, però tampoc no ho és completament si les conseqüències dels seus actes són impredictibles.

Pel que fa a les ressonàncies teològiques, podem recordar la importància de l'observador en la física quàntica. Un déu observador de l'Univers podria ser el que fes que aquest tingués un estat concret en lloc de trobar-se en una superposició d'estats. D'altra banda, si el principi d'inèrcia suggeria un allunyament de Déu del món, el caos determinista exigeix que l'observador que vulgui seguir al corrent de l'estat del sistema no el pot deixar durant un temps llarg, ja que errors diminuts s'hauran amplificat. Així, l'observador del sistema caòtic no es pot desentendre del sistema com ho feia el rellotger de l'analogia mecanicista. L'indeterminisme quàntic i l'amplificació caòtica —la relació entre les quals no és immediata— suggereixen una acció contínua sobre el món a través d'un atzar irreductible i amplificador, en lloc del món tancat del determinisme clàssic.

La imatge de l'atractor estrany pot substituir amb avantatge la metàfora pendular de les oscil·lacions de la història. A diferència del pèndol clàssic, que sempre torna a passar pels mateixos estats, en un procés repetitiu, els atractors estranys poden divagar entorn de dos —o més— pols d'atracció, però sense repetir mai exactament cap dels seus estats, ni presentar una periodicitat. Tal com la successió irregular de dies d'alta i de baixa pressió en el temps meteorològic, la successió de dies de pau i de guerra, o de tendències oposades qualssevol, sembla més irregular que no pas una repetició constant.

La teologia, enfrontada a la temporalitat humana i l'eternitat divina, ha posat també la qüestió de la relativitat del temps: «Per al Senyor, mil anys són un dia», diuen els Salms i l'Epístola de sant Pere. La fi dels temps és una altra qüestió freqüent en el cristianisme primitiu: hi al·ludeixen els Evangelis, les Epístoles de sant Pau i l'Apocalipsi. El judici final es produirà immediatament després de la mort de cada individu, o bé col·lectivament a la fi dels temps? Alguns autors s'inclinen per l'opció «*mox post mortem*» (immediatament després de la mort) i en la butlla *Benedictus Deus* (1336) es

condemna la idea de l'ajornament de la visió beatífica fins al dia del judici universal. Per a un perceptor difunt, però, el temps no tornaria a fluir fins al moment de la resurrecció, de manera que la idea de resurrecció a l'endemà de la mort o al cap de milions d'anys serien conciliables.

No cal dir la gran importància de les idees cosmològiques en teologia i filosofia: els problemes de l'edat i de l'origen de l'Univers i la fi del món tenen una influència cultural que depassa àmpliament el marc dels especialistes. La idea d'un Déu creador, d'una racionalitat de l'Univers, és present en moltes cultures. En aquest segle, per primer cop, s'ha pogut esbrinar l'edat de l'Univers. La matèria apareix carregada d'història, amb la formació successiva d'àtoms cada vegada més pesants en el si de les estrelles. Pel que fa al futur, resultats recents, molt sorprenents, semblen indicar que l'expansió és accelerada, en lloc d'alentida. Podria ser que dintre de pocs anys el model cosmològic fos considerablement diferent de l'actual.

El conflicte entre reversibilitat mecànica i irreversibilitat termodinàmica suggereix els debats sobre negació o afirmació de la realitat del temps. És aquest un autèntic fluir unidireccional o una il·lusió de les nostres limitacions? Per a Plató, el temps més real seria l'eternitat, però la veiem sota la forma imperfecta de la temporalitat, de manera que el temps seria una «imatge mòbil de l'eternitat», segons diu en el *Timeu*. En la tradició mecànica, el temps més profund seria reversible, corresponent al món microscòpic; mentre que per a d'altres físics el temps real és irreversible, i el temps reversible és una extrapolació a situacions sense viscositat ni altres efectes dissipatius. En tot cas, el fet que l'Univers tingui un caràcter evolutiu i dinàmic fa que no el puguem identificar amb l'Ésser postulat per Parmènides.

Una de les característiques de la nostra època és la consciència de viure acceleradament, amb una successió vertiginosa de canvis tecnològics que fa impossible tota predicció a mig termini. El valor del temps, doncs, resulta diferent en la nostra època i espai cultural que en èpoques anteriors o altres espais culturals. La termodinàmica pot ajudar a reflexionar sobre el diferent valor del temps des de les perspectives econòmica i ecològica: la primera intenta optimitzar la potència, mentre que la segona vol optimitzar el rendiment. Des d'una perspectiva que intenti introduir consideracions ecològiques dintre de l'economia, aquestes reflexions sobre el compromís entre el rendiment i la potència són imprescindibles.

4. EL TEMPS EN BIOLOGIA

El pas del temps és especialment punyent en biologia, atesa la cursa vers la mort que suposa la vida; el pas d'aquesta suposa alhora una irreversibilitat, en ocasions molt dolorosa, i un enriquiment en experiència. La visió del temps en biologia, doncs, és rica i diversa com la de la física, però més immediata. En aquest capítol explorarem les visions del temps en les ciències de la natura. En primer lloc, ens preguntarem pels ritmes vitals, els rellotges biològics i la percepció del temps. A continuació, un repàs a la geologia ens recordarà com la visió de la natura canvià en els segles XVIII i XIX, amb el descobriment d'una enorme profunditat temporal i del dinamisme creatiu dels tempteigs de l'evolució. Finalment, considerarem les devastacions de l'envelliment i de la mort. Així, contemplarem el temps biològic des de tres facetes: el temps regulador, creador i destructor.

Aquest darrer aspecte del temps ha estat el més glossat al llarg de la història per poetes i per filòsofs, és el que més sentim i el que més ens dol. Tanmateix, si sortim una estona de nosaltres i contemplem la natura a gran escala, podem advertir els aspectes creadors del temps destacats per la teoria de l'evolució, que ha fascinat els naturalistes però també pensadors com Bergson a *L'évolution créatrice* o Teilhard de Chardin a *El fenomen humà* i *El medi diví*. Ens sentim presos en una vasta correntia, part d'un poble, d'una història, d'una espècie, d'un fenomen turbulent i inaturable.

4.1. EL TEMPS REGULADOR: RELLOTGES BIOLÒGICS

Hi ha ritmes en el cel i ritmes en la Terra: el dia, la nit, les fases de la Lluna i les estacions de l'any són els que ens resulten més familiars; però n'hi ha d'altres dels quals pràcticament no som conscients i que tenen poca incidència en les nostres vides: en són exemples els cicles d'activitat solar d'onze anys de periodicitat, els períodes de retorn dels cometes (com ara el cometa Halley, que retorna a les proximitats de la Terra cada setanta-dos anys), el gir de l'eix de rotació de la Terra al voltant de la perpendicular al pla de l'eclíptica, amb una periodicitat d'uns 26.000 anys. Hi ha fenòmens aproximadament repetitius però sense període fix, i per tant relativament impredecibles, com les bonances i tempestes meteorològiques, i els canvis de polaritat del magnetisme terrestre i les divagacions dels seus pols. Hi ha fletxes del temps que imposen una direccionalitat irrevocable: l'alentiment de la rotació de la Terra sobre el seu eix, l'augment de la distància entre la Terra i la Lluna, l'esdevenir des del naixement cap a la mort... I hi ha el temps dels fenòmens singulars i irrepetibles, que no són ni repetició ni flux, sinó singularitats fulgurants, com l'inici de l'Univers, l'explosió d'una supernova, o alguns desvetllaments de la plenitud de la consciència. Els organismes vius experimenten aquesta multiplicitat: la repetició i la fuga, la roda del temps i la fletxa del temps, el caos i la singularitat. En aquesta secció, ens concentrarem en els ritmes, les repeticions, les cadències diverses dels fenòmens biològics.

4.1.1. Els ritmes biològics

L'estudi dels diversos ritmes biològics, que constitueix la ciència anomenada *cronobiologia*, començà el 1930 amb les recerques d'E. Bünning, i ha pres força volada en els anys seixanta. A. T. Winfree i J. Aschoff, dos dels principals estudiosos d'aquests temes, consideren que els comportaments oscil·latoris de la matèria viva són tan importants com les estructures espacials dels òrgans. Immersos en un entorn natural dotat de ritmes, no és sorprenent que els ritmes dels organismes que hi viuen hi estiguin més o menys adaptats. En efecte, molts dels ritmes biològics són circadians (és a dir, propers a la periodicitat del dia i la nit). Alguns exemples d'aquests ritmes són: la temperatura de l'organisme, el

ritme cardíac i la pressió sanguínia són màxims cap a les quatre de la tarda i mínims cap a les quatre del matí; la concentració de prolactina en les mares que alleten és màxima cap a les tres de la matinada; el màxim de la testosterona s'ateny cap a les nou del matí; a la una de la matinada hi ha una concentració màxima de limfòcits T, mentre que a les vuit del matí la concentració és mínima; el subministrament de determinats medicaments és òptim a unes certes hores (en alguns pacients de càncer, l'efectivitat sembla màxima a les sis de la matinada i mínima a les sis de la tarda). Tots aquests ritmes són propers a les vint-i-quatre hores. També hem experimentat les molèsties de les modificacions d'aquests ritmes quan fem un viatge llarg a fusos horaris molt diferents del nostre.

Però hi ha ritmes més ràpids o més lents que no pas el dia: alguns són de l'ordre de segons (els ritmes revelats pels encefalogrames: el ritme alfa del repòs, de 8-13 Hz (hertzis, repeticions per segon), el ritme beta de vigília, de 18-30 Hz, o el ritme gamma, d'uns 40 Hz); n'hi ha de minuts (els batecs del cor, les inspiracions i expiracions de la respiració), mensuals (la menstruació), anuals (els anells de fusta en els troncs dels arbres, la producció del fullam i les flors, l'època de zel d'algunes espècies), i fins i tot alguns que arriben a periodicitats més llargues i força curioses, com els disset anys en el cicle reproductiu d'alguns insectes que passen molt anys enterats en forma de larves. També podríem evocar la resposta de diferents òrgans a diferents freqüències. Per exemple, els pigments fotosensibles de la retina responen a radiacions de 450 nm, 540 nm i 590 nm, i la clorofil·la té un màxim d'absorció prop dels 500 nm, que són algunes de les radiacions en què el Sol emet més energia. Si visquéssim prop d'una estrella una mica més freda, aquests pigments servirien de ben poc, ja que emetria prioritàriament llum amb longituds d'ona més llargues. Amb l'evolució, s'observa un eixamplament en l'espectre de ritmes biològics del conjunt de les espècies, que permet una divisió del treball i una especialització superior, amb un aprofitament més intensiu dels recursos naturals.

Alguns ritmes varien amb la grandària de l'animal. Així, per exemple, el ritme metabòlic basal, o ritme de consum d'energia per unitat de temps en repòs, augmenta com la potència $3/4$ de la massa de l'animal (és a dir, augmenta una mica més lentament que la massa); com a conseqüència, el ritme del cor és més ràpid com més petit és l'animal (varia inversament a l'arrel quarta de la massa de l'animal, com a compromís entre la necessitat més gran d'oxigen en

l'animal més gran i el volum cardíac també més gran, ja que, per impulsar un cert flux sanguini, un cor gran no cal que es contregui tantes vegades com un de petit). Anàlogament, el ritme de respiració varia amb el mateix factor d'escala, i el ritme d'inspiracions per minut és aproximadament la quarta part del nombre de batecs de cor per minut.

Hom ha dit que el nombre de batecs de cor és si fa no fa el mateix per a totes les espècies: és a dir, viuen més els animals més grans, que són els de cor més lent. En els mamífers, el nombre total de batecs cardíacs al llarg de la vida és d'uns 800 milions, aproximadament. Els ratolins hi arriben en poc temps i els elefants tarden molt més a assolir-lo. En les estrelles, en canvi, trobem la situació oposada: com més grans són, menys duren. Les estrelles com el Sol duren uns 10.000 milions d'anys, però les que tenen el doble de massa només duren uns 600 milions d'anys, i les de massa quàdruple tan sols uns 40 milions d'anys. Això és perquè en les estrelles més grans la pressió gravitatòria és més gran; per contrarestar-la, les estrelles han d'estar més calentes, cosa que fa que radiïn molta més energia i, per tant, consumeixin més combustible. Per això, les estrelles de massa gaire més gran que la del Sol no poden tenir vida intel·ligent en els seus entorns, ja que no duren prou com perquè, si tinguessin un planeta adient, s'hi pogués produir vida, que tardà uns 1.200 milions d'anys a aparèixer després de la formació de la Terra.

4.1.2. *Els rellotges biològics*

Ens preguntarem ara com es produeixen alguns dels ritmes biològics. Començarem pels ritmes circadians, de període proper a les 24 hores. D'antuvi, hom els havia atribuït a mecanismes exteriors (llum del sol, estacionalitat...). Fa ja 200 anys, alguns biòlegs observaren, però, que les fulles d'algunes plantes, que s'obren de dia i es tanquen a la nit, seguien obrint-se i tancant-se a les mateixes hores malgrat trobar-se a l'interior d'un armari fosc, de manera que el ritme d'aquest procés no era degut directament als efectes de les variacions d'il·luminació. Aquesta perduració de ritmes biològics circadians en organismes en un ambient d'il·luminació uniforme també ha estat observada en cargols de mar i fins i tot en humans que resideixen durant unes quantes setmanes sota terra. Hom

ha comprovat repetidament, des de principis dels setanta, que molts d'aquests ritmes són interns, deguts a rellotges biològics basats en diversos processos bioquímics. Des del 1975, l'estudi d'aquests ritmes constitueix una ciència cada vegada més activa.

De fet, molts dels ritmes característics humans, com els de molts altres animals, no són exactament iguals al dia, sinó de període lleugerament superior (de vint-i-set a trenta hores). La relació amb la periodicitat diürna i nocturna fa que el rellotge biològic torni a posar-se a zero cada matí. Aquesta resincronització és necessària, ja que, en principi, el ritme temporal podria variar amb la temperatura, la humitat i altres factors, que podrien inutilitzar l'eficàcia del rellotge biològic intern. En absència d'aquesta resincronització, el cos seria dominat pel rellotge intern i la seva noció del temps es modificaria. En general, el procés temporitzador no és cap mecanisme oscil·latori, sinó més aviat la producció contínua d'alguna substància que, un cop arribada a una concentració crítica, provoca que es descarregui un senyal, i es torna a iniciar novament el procés. El ritme depèn, aleshores, de la velocitat de producció de la substància i del llindar crític de disparament del senyal.

4.1.2.1. Rellotges circadians

En el humans hi ha dos rellotges circadians principals: un regula el cicle son-vigília, i l'altre la temperatura del cos i altres aspectes fisiològics. Aquests ritmes poden deixar de funcionar sincrònicament després d'un viatge llarg amb avió. Es considera que el rellotge dominant és el que regula l'alternança son-vigília. La primera pista sobre aquest rellotge arribà amb els estudis de F. Stephan i I. Zucker de 1972, en estudiar alteracions induïdes dels ritmes de les rates per lesions amb elèctrodes en uns conjunts de cèl·lules de l'hipotàlem, anomenats *nuclis supraquiasmàtics*, que estan connectats amb la retina i semblen organitzar cicles de repòs i activitat. Aquests nuclis es troben just sobre el quiasma òptic, zona en què es creuen els nervis òptics procedents dels dos ulls (recordem que el nervi òptic de l'ull dret va a l'hemisferi esquerre del cervell, on els seus senyals són processats, i viceversa). Això permet que els nuclis supraquiasmàtics estiguin relacionats amb la intensitat exterior de la llum, malgrat trobar-se a l'interior del cervell. Aquesta inervia-

ció encara no està completada en el nadó, i no és completa fins als cinc o sis mesos després del naixement.

Els nuclis supraquiasmàtics estan connectats amb la glàndula pineal (anomenada també, per la seva forma, *tercer ull*, i on, segons postulava Descartes, l'ànima es relacionaria amb el cos), una glàndula sensible a la llum i connectada indirectament a la retina via els nuclis supraquiasmàtics. Els nuclis marquen el ritme principal, que és traduït per la glàndula pineal en forma d'emissions de melatonina i de serotonina, les quals afecten, per retroalimentació, els nuclis supraquiasmàtics. La melatonina (proteïna de la son) es produeix al vespre i durant la nit i la serotonina durant el dia. Aquesta alternança es deu a la que hi ha entre dos receptors (alfa i beta) de les cèl·lules de la glàndula pineal, que canvien la seva activitat segons les hores del dia o del cicle de 24 hores. Així, els receptors beta s'activen cap al tard, i estimulen la producció de melatonina, la qual varia amb les estacions i està relacionada amb la incidència i la durada de la hibernació. Les seves alteracions provoquen insomnis i el seu excés pot provocar depressions, habituals en els països nòrdics, que són tractades amb il·luminacions artificials intenses (fototeràpia).

S'ha comprovat en molt animals que la lesió en els nuclis supraquiasmàtics provoca una pèrdua de ritmes. Alguns experiments especialment reveladors foren duts a terme amb uns hàmmsters daurats que presenten mutants amb ritmes diferents (de vint-i-quatre i de vint-i-dues hores), temps que reparteixen en una successió de períodes de vigília i de son amb una gran exactitud. S'inutilitzà els nuclis supraquiasmàtics d'alguns animals i se'ls injectà líquid procedent del nucli supraquiasmàtic d'un altre animal, amb ritme circadià de periodicitat diferent a l'original. Mentre que els hàmmsters que conservaven incòlumes els nuclis supraquiasmàtics seguien exactament el seu ritme característic, els que havien estat lesionats s'adaptaren al ritme de l'animal d'on procedia la substància injectada.

Des de 1986, s'han explorat els gens que regulen aquesta activitat en les mosques i en els ratolins. Es tracta dels gens *per* (de període, i que es troba en el cromosoma X de les mosques) i el *tim* (de *timeless*, que es troba en el cromosoma 2 de les mosques). Aquests gens produeixen les proteïnes respectives amb una certa periodicitat, i aquestes proteïnes es combinen entre sí. L'acció d'aquests dos gens està lligada a la d'un tercer (*clock*) que xifra un factor de transcripció que controla la lectura dels anteriors. El 1997, aquests gens foren localitzats en els humans.

4.1.2.2. El rellotge cardíac

Alguns òrgans, com ara el cor, tenen els seus propis rellotges biològics o marcapassos particulars. Des del punt de vista físicomatemàtic, el cicle cardíac és diferent d'un oscil·lador harmònic (com ara un pèndol o una molla). En aquests, la freqüència no depèn de l'amplitud, però l'amplitud depèn de les condicions inicials. En canvi, en el cor, tant la freqüència com l'amplitud del moviment estan regulades pel propi cor i no depenen, doncs, de les condicions inicials. Aquesta situació s'anomena *cicle límit*. En cardiologia, l'estudi de la forma d'aquests cicles en l'electrocardiograma és una font d'informació sobre la localització de les diverses anomalies que en poden modificar el curs normal. Els estudis sobre dinàmica no lineal en els darrers vint anys han suposat un estímul considerable per a l'estudi encara més detallat del ritme del cor. S'ha observat, per exemple, que el temps entre dues sistoles o dues diàstoles consecutives no és sempre exactament el mateix, sinó que presenta petites variacions irregulars. Quan el moviment esdevé excessivament regular, és una indicació que el cor pot entrar en una situació perillosa com la fibril·lació ventricular: en lloc de contreure's sincronitzadament, les cèl·lules del múscul del ventricle es contreuen i relaxen independentment, de manera desordenada i espasmòdica i no fan prou força per impulsar la sang. Des del punt de vista físic, aquesta situació correspon a un atractor estrany.

4.1.2.3. Rellotges cel·lulars

També són interessants altres rellotges que actuen a escala cel·lular. S'ha dedicat una atenció especial al que regula el ritme de la mitosi o divisió cel·lular. Aquest ritme és variable: en les cèl·lules de l'embrió hi ha una divisió cada pocs minuts; en les de la pell i els budells dels joves, una divisió cada pocs dies; en les cèl·lules dels músculs, cada pocs mesos; en les neurones, no hi ha duplicació. El ritme de la mitosi és controlat per una molècula (MPF: *maturation promoting factor* o factor de promoció de la maduració), la naturalesa de la qual fou aclarida el 1988. Aquesta proteïna està composta per dues cadenes d'aminoàcids; una d'elles és la ciclina, que té un nivell baix en la cèl·lula nova però que, fabricada a ritme constant, va incrementant la seva concentració fins que, en

arribar a un nivell crític, es combina amb una segona cadena, *cdc2*, de nivell fix. La combinació d'aquestes dues cadenes les activa i les converteix en MPF, la qual promou la mitosi. Iniciada aquesta, es destrueix la ciclina, i en els casos en què no es destrueix, la mitosi s'atura.

4.1.2.4. Sincronització de rellotges

Quan en un sistema hi ha ritmes diferents i individus diversos, s'aconsegueixen funcionaments òptims quan els cicles tenen entre ells algunes proporcions especials i quan els individus assoleixen un cert grau de sincronització. La sincronització dels rellotges biològics de diversos animals de la mateixa espècie resulta especialment espectacular. Un exemple sorprenent és el d'un cert tipus de papallones-cuques de llum de Malàsia que es posen sobre els arbres i van sincronitzant la seva titil·lació fins a produir una claror força intensa al mateix ritme. Inicialment, cada cuca produeix la seva titil·lació independentment de les altres, de manera que la il·luminació és contínua i feble: a cada moment veuríem la titil·lació d'unes quantes cuques, que després s'apagaria i seria substituïda per la titil·lació d'altres cuques. De mica en mica, però, la dispersió inicial en la titil·lació va disminuint i al final totes les cuques titil·len simultàniament i amb el mateix període. Llavors, l'arbre s'encén i s'apaga espectacularment. Aquests fenòmens de sincronització són deguts habitualment a algun marcador químic, com ara una feromona. La situació és anàloga als soldats en una desfilada: inicialment, els passos i els períodes es produeixen en moments diferents i hom sent la remor contínua i sorda del pas de maniobra. De mica en mica es van sincronitzant fins que se sent, en la desfilada, la coordinació sincronitzada i rítmica de les passes.

4.1.3. *La psicologia del temps*

Els estudis sobre la psicologia del temps presenten tres facetes de gran interès i d'intensa activitat; la percepció del temps, l'evocació temporal de la memòria i el desenvolupament de la noció del temps en els infants.

4.1.3.1. La percepció del temps

Els estudis sobre la psicologia de la percepció del temps s'inicien a mitjan segle XIX amb el propòsit de comparar l'apreciació subjectiva d'interval amb el temps objectiu transcorregut. Aquests estudis s'han intensificat molt en el segle XX, per tal d'esbrinar, per exemple, les influències de l'edat, de les drogues, de la personalitat, de les malalties, de l'atenció i d'altres factors sobre la percepció del temps, i s'han estès també a diverses espècies animals.

Alguns experiments característics consisteixen a prendre grups de persones de diferents edats i, després d'haver-los fet passar un cert període de temps (per exemple tres minuts) davant d'un rellotge, hom els fa dir, sense rellotge, que indiquin quan creuen que han transcorregut tres minuts. Segons les experiències, el grup de gent entre vint i vint-i-cinc anys indicaren la fi del període al cap de 3.03 minuts, cosa que posa de manifest que, habitualment, la mesura d'interval curts acostuma a ser bastant realista en persones entrenades d'entre uns vint i uns quaranta anys; el grup entre quaranta-cinc i cinquanta anys deixà passar 3.16 minuts, i el grup entre seixanta i setanta anys deixà passar 3.40 minuts. Per tant, la sensació de temps és més lenta en el grup de més edat, és a dir, en la seva percepció, creuen que han passat uns tres minuts quan en realitat n'han passat quatre i tenen, doncs, la sensació que el temps passa més ràpid.

Altres experiments també poden ser duts a terme amb animals: hom els dona una recompensa, tres minuts (posem per cas) després que s'hagi encès un llum o sonat un timbre, i repeteix un cert nombre de vegades l'experiment, tot estudiant les reaccions dels animals a mesura que passa el temps. Hom observa que, al cap de poc més de dos minuts i mig de tranquil·litat, els animals comencen a mostrar una expectació agitada, la qual es manté durant un cert interval si la recompensa no arriba en el temps esperat. Curiosament, la proporció del temps d'espera tranquil·la i d'agitació expectant és gairebé independent de la durada de l'interval entre l'estímul i la recompensa.

Aquests dos tipus d'experiments són de caràcter prospectiu, és a dir, s'ocupen del temps transcorregut a partir d'un cert senyal. Altres menes d'experiments tenen caràcter retrospectiu: hom pregunta, per exemple, quant de temps ha transcorregut des d'un cert esdeveniment no anunciat prèviament amb èmfasi —per exemple, des del moment en què un llum parpellejà.

Per tal de sistematitzar els resultats de les observacions dintre d'un esquema explicatiu, hom ha proposat diversos models. Un d'ells fa intervenir un rellotge intern, un emmagatzemador de memòria i un element comparador. La idea del rellotge intern el ritme del qual pot ser afectat per diversos factors ve dels anys trenta, amb els treballs del psicòleg americà H. Hoagland. A mesura que avancen els estudis cerebrals se'n concreten més els possibles mecanismes i localitzacions, en especial sobre quina mena de rellotge cerebral detecta el pas del temps a l'escala entre segons i minuts. W. Meck i M. Matell han proposat un model basat en estudis anatòmics, en què un grup de neurones recull els senyals temporals de tot el cervell i coordina els que es produeixen simultàniament i que es refereixen a esdeveniments singulars. Les neurones regulen també intervals temporals que interessa mesurar (temps que tarda a encendre's un semàfor, a bullir un ou, a retenir la pilota en un esport...). Aquest rellotge és regulat per la presència de dopamina (si n'hi ha més concentració, el rellotge va més de pressa). Altres substàncies poden modificar el ritme d'aquest rellotge (la cocaïna i les amfetamines acceleren el pas del temps, mentre que la marihuana l'alenteix). Un altre factor que el modifica és la temperatura: temperatures baixes acceleren el sentit subjectiu del temps; la febre, en canvi, en produeix un alentiment.

La capacitat d'avaluar durades breus de temps té una gran importància per a l'aprenentatge i la supervivència. Aquesta funció és feta pel cervell mitjà, estriat, carregat de neurones espinoses, cadascuna de les quals està connectada amb moltes altres (una desena de milers) i que detecten oscil·lacions i ritmes de les cèl·lules de tot el cervell. Quan el cervell adverteix una cosa nova o singular, emet dopamina sobre les neurones espinoses, que reben un impuls i comencen a integrar senyals temporals. D'aquesta manera, el cervell aprèn a adelantar-se segons o minuts als esdeveniments. Experiments amb rates fan que aquestes aprenguin a polsar palanques a intervals regulars, però quan se'ls extreu les cèl·lules que produeixen dopamina perden la capacitat de regular el temps. Els nivells de dopamina disminueixen amb l'edat i per això el ritmòmetre es fa més lent i sembla que el temps passi més ràpid. Quan el nivell de dopamina és elevat, el rellotge funciona ràpidament.

El model del rellotge intern, però, no explica perquè l'atenció fixada en alguna activitat fa semblar que el temps sigui més breu. Per això, alguns psicòlegs creuen que una part important de la mesura del

temps depèn del ritme de fenòmens exteriors, de manera que com més variacions exteriors veu l'individu, més temps li sembla que ha transcorregut. En un interval avorrit i buit, un individu es fixa en molts detalls i petits canvis irrelevants del seu entorn, i té la impressió que ha passat molt de temps, al contrari d'un individu absorit en una activitat interessant. En el model mecanístic esmentat anteriorment, els efectes de l'atenció es manifestarien no en el ritme del rellotge intern, sinó en l'emmagatzemament de dades. L'atenció interna faria que les dades exteriors de què depèn la sensació temporal no fossin enregistrades, i el temps semblaria passar més lentament.

4.1.3.2. L'evocació i l'aprenentatge del temps

Els mecanismes comentats no descriuen l'avaluació temporal retrospectiva, la qual està relacionada amb la memòria. Hom ha fet molts experiments sobre la temporalitat en la memòria com, posem per cas, l'ordenació temporal de records —com, per exemple, de dues paraules quina ha estat pronunciada abans en una llista, o de dos records, quin és anterior. Habitualment, els períodes curts es localitzen millor que els llargs —així, sovint és més fàcil situar un esdeveniment passat en l'hora del dia, més que no pas en el dia de la setmana. També és més fàcil recordar les relacions d'ordre entre mots relacionats amb la mateixa categoria d'objectes que no pas amb objectes completament dissemblants, cosa que podria indicar que sentir anomenar un objecte desperta l'evocació d'objectes o fets semblants, cosa que permet ordenar-los millor.

L'estudi de com es desenvolupa la consciència de temps en els infants és un tema clàssic de la psicologia des dels treballs de Piaget a mitjan segle XX. Sembla que ja en els primers quatre o cinc mesos els nens són capaços de distingir entre ritmes diferents, prou ben marcats; a poc a poc van observant l'ordre de les activitats familiars més freqüents; cap als dos anys i mig, l'ús dels temps verbals es va afirmant, cosa que indica que ja fan prou bé la distinció passat-present-futur; en canvi, tarden més a tenir consciència d'interval temporal més llargs, com els dies de la setmana o les estacions o els mesos de l'any; i encara més a percebre el temps com una entitat homogènia en què tot esdeveniment pot ser situat i comparat amb els altres, independentment del moviment o del repòs associat a l'esdeveniment i que, en nens petits, dificulta les comparacions temporals.

4.1.3.3. Qüestions conceptuals

Hi ha tres qüestions que mereixen un comentari especial: l'existència d'una mena de quàntum temporal en la percepció del temps; el ritme com a límit de la nostra activitat i la importància de la sincronització col·lectiva.

Hi ha, segons sembla, un quàntum de percepció temporal, és a dir, un temps mínim per sota del qual no percebem el pas del temps. Estímul separats per menys de dos mil·lisegons, aproximadament, ens semblen subjectivament simultanis. Qualsevol esdeveniment més breu que aquesta durada no té, per a nosaltres, estructura temporal. Si la separació entre dos sons és més gran que dos mil·lisegons, els podem percebre com a diferents, però cal que els separin com a mínim uns vint mil·lisegons per tal que en poguem reconèixer l'ordre en què han estat produïts o captats. Aquest període és, aproximadament, corresponent a les vint-i-sis imatges per segon que podem distingir, i que marquen el pas d'imatges en el cinema. Encara més llarg és el període temporal necessari per respondre inconscientment o, més encara, per respondre conscientment a un estímul. Així, l'estructura de la percepció temporal és jeràrquica.

El mecanisme del quàntum temporal de la consciència és complex i gairebé desconegut. Crick i Koch proposen que la consciència visual està relacionada amb l'activitat neuronal de la capa cortical inferior, especialment de les cèl·lules piramidals grans. Aquestes àrees estan connectades a una zona del tàlem que regula el processament i la sincronització de l'activitat neuronal cortical amb uns senyals d'una freqüència d'uns quaranta hertz. Llinàs ha indicat, a partir de dades magnetoencefalogràfiques, que cada dotze mil·lèsimes de segon l'escorça cerebral és escombrada per una ona que integra les seves parts. Això proporcionaria un quàntum de temps o de consciència, de manera que la nostra visió del món seria com una pel·lícula de cinema: la superposició temporal d'entitats fragmentàries.

Els ritmes interns posen un límit a la nostra capacitat d'acció. En trobem un exemple simple i revelador en la velocitat i el cansament en la cursa. Si correm més del que els recursos metabòlics directament disponibles ens ho permeten, cal que el cos consumeixi reserves, i això provoca cansament. Hi ha, doncs, limitacions energètiques a la velocitat de la cursa, i a la percepció de les nostres

possibilitats respecte de la velocitat o el ritme de fatiga corporal. La situació és semblant a la que es presenta en el món econòmic entre crèdit i estalvi.

També hem subratllat la importància de la sincronització en alguns comportaments col·lectius. Socialment, hi ha èpoques en què una sincronització d'esforços i d'il·lusions fa que el rendiment creatiu d'una societat determinada sigui molt elevat. Reflexionar sobre els mecanismes que produeixen aquesta sincronització en biologia pot ajudar a comprendre els elements convenients per assolir aquest estadi col·lectiu.

4.2. EL TEMPS CREADOR: L'EVOLUCIÓ

En les ciències naturals, el temps té una faceta creadora: l'embriologia i l'evolució. En aquests fenòmens, assistim al desplegament de noves formes de vida o a la formació de l'individu a partir de l'ou fecundat. La teoria de l'evolució ha suposat la transformació a més gran escala de les idees sobre la relació entre temps i biologia. Durant mil·lennis, hom havia pensat que la Terra i les espècies biològiques foren creades tal com són actualment. Aquest fixisme tenia tant una arrel teològica com una d'ontològica, que identificava l'ésser amb la permanència. La missió del biòleg era descriure i classificar els éssers, entre els quals els fòssils, ja coneguts i interpretats com a espècies desaparegudes, però sense cap relació causal amb les actuals.

Pel que fa a la morfogènesi, o aparició de noves estructures, ha estat un repte i un estímul per a les matemàtiques, i ha dut a models remarcables com el de Turing o la teoria de les catàstrofes de R. Thom. Quan Darwin proposà l'evolució natural, Haeckel aventurà la possible analogia del procés evolutiu amb el procés embriològic i conjecturà que, al llarg del darrer, l'individu va presentant formes d'espècies primitives més i més evolucionades a mesura que avança l'embriogènesi o, en altres paraules, «l'ontogènia recapitula la filogènia». Durant un temps, aquesta possible semblança resultà molt atractiva, i es dedicaren esforços considerables a intentar bastir arbres evolutius a partir d'observacions embriològiques.

Veurem, en primer lloc, com la geologia va proposar una imatge dinàmica del temps, i com aquest dinamisme penetrà en la biologia.

4.2.1. *El temps en geologia*

La pregunta sobre l'edat de la Terra és força recent: tot just data del segle XVIII. Abans, hom identificava l'edat de la Terra amb la de l'Univers, i calculava la segona a partir de la primera, la qual era obtinguda sumant les edats dels patriarques i fent algunes interpolacions amb les cronologies d'altres cultures per tal de cobrir els buits de la Bíblia. Aquesta activitat, que afavorí un estudi comparat de cronologies de diferents cultures, fou duta a terme per autors molt diversos: Beda el venerable arribà a la conclusió que l'Univers fou creat el 3952 aC; per a Luter, el 4000 aC; per a Newton, el 3998 aC; per al bisbe irlandès James Usher, autor de l'estimació més coneguda, l'Univers hauria estat creat el dia 23 d'octubre del 4004 aC. Veiem, doncs, que se suposava que tant la Terra com l'Univers tenien una edat molt limitada. Kant i Laplace, a finals del segle XVIII, foren els primers a proposar teories de formació del sistema solar i, per tant, de la Terra, dintre d'un Univers més antic.

4.2.1.1. Els mètodes paleontològics

Els fòssils van tenir un paper essencial en el descobriment de l'antiguitat i la història de la Terra. Els fòssils han estat coneguts sempre, però la seva interpretació ha estat molt diversa al llarg de les èpoques: per a alguns eren manifestacions de vides extingides, de manera que els peixos o les petxines trobades dalt de les muntanyes demostraven l'existència del Diluvi Universal; per a d'altres, eren curiositats de la naturalesa mineral que imitava formes vives; per a d'altres, eren escultures fetes per Satanàs, per imitar la Creació i enganyar els humans. El 1666 fou un any clau en la interpretació dels fòssils: Steno (nom italianitzat del danès Niels Steensen) comparà unes dents fòssils triangulars (*glossopetrae*) amb dents de tauró, i proposà que les dents fòssils eren dents de tauró petrificades. L'originalitat de Steno fou proposar que les roques en què es trobaven aquestes dents no havien estat sempre dures, sinó que inicialment eren toves com fang i havien permès que el tauró hi quedés enterrat, i que després s'havien endurit i convertit en mineral les parts dures de les dents. Aquesta idea era nova, ja que abans hom pensava que les roques havien estat sempre dures, cosa que semblava excloure la possibilitat que els fòssils trobats dintre seu poguessin provenir

TAULA 5. Les eres geològiques en milions d'anys (Ma).

<i>Paleozoic</i>	(-545 Ma a -248 Ma)
Cambrià	(-545 a -495)
Ordovicià	(-495 a -443)
Silurià	(-443 a -417)
Devonià	(-417 a -354)
Carbonífer	(-354 a -290)
Permià	(-290 a -248)
<i>Mesozoic</i>	(-248 Ma a -65 Ma)
Triàsic	(-248 a -206)
Juràssic	(-206 a -142)
Cretaci	(-142 a -65)
<i>Cenozoic</i>	(-65 Ma a 0 Ma)
Paleogen*	(-65 a -24)
Paleocè	(-65 a -55)
Eocè	(-55 a -34)
Oligocè	(-34 a -24)
Neogen*	(-24 a -1,8)
Miocè	(-24 a -5,3)
Pliocè	(-5,3 a -1,8)
Quaternari	(-1,8 a 0)
Pleistocè	(-1,8 a -0,01)
Holocè	(-0,01 a 0)

*El Paleogen i el Neogen són també anomenats *terciari inferior* i *terciari superior*, respectivament.

realment d'animals o de plantes. Steno inicià així l'estudi dels fòssils i de la seva relació amb els estrats on es troben.

Les primeres reaccions a una història terrestre, les etapes de la qual estaven marcades pels fòssils d'espècies extingides, foren les del catastrofisme, teoria que admetia que la història de la Terra passa per una sèrie de catàstrofes que n'esborraren molts habitants, i la darrera de les quals hauria estat el Diluvi. Com que les catàstrofes són ràpides, hom podia intentar conciliar una escala temporal relativament breu amb l'existència de tantes espècies desaparegudes. Recordem, al cap i al la fi, que segons els Salms «mil anys són un dia als teus ulls...», de manera que hom podia admetre que sis dies fossin uns sis mil anys.

La revolució industrial accelerà el coneixement dels fòssils, amb l'aprofundiment de les mines i la construcció de túnels per als

ferrocarrils i nous canals, activitat que suposà un estímul considerable per al coneixement de la geologia. El 1795, James Hutton publicà *The theory of the Earth*, en què trencava per primer cop els esquemes bíblics i proposava una teoria, anomenada posteriorment *uniformisme* en contraposició al catastrofisme, que interpretava el temps terrestre com una successió de grans cicles geològics. En efecte, el que observem habitualment és l'erosió dels terrenys per part del vent i de la pluja, i per tant podem imaginar una geologia en procés de degradació. Hutton imaginà un procés de regeneració del relleu: l'acumulació de capes de sediments augmentaria la temperatura i la pressió dels sediments inferiors, els quals serien duts a activitats volcàniques que farien créixer novament el relleu. La teoria no començà a ser acceptada fins que Charles Lyell l'adoptà i la desenvolupà amb detall, al voltant de 1830, en els *Principles of Geology*, que foren molt influents.

William Smith, autor, el 1815, del primer mapa geològic modern (d'Anglaterra, Gal·les i part d'Escòcia) identificà per primera vegada els fòssils com a marcadors acurats de l'edat dels sediments i de les roques. Per exemple, hom pot trobar roca calcària en sediments del càmbric i del juràssic; ara bé, els fòssils de trilobites són específics del càmbric i són absents en les roques del juràssic. Georges Cuvier arribà gairebé a la mateixa època a conclusions semblants, tot estudiant sediments de les zones properes a París. Així, els fòssils marcadors tenien un caràcter que ultrapassava el local o regional i valia per a amplíssimes zones de la Terra. El 1841, J. Phillips introduïa la classificació dels temps geològics en Paleozoic, Mesozoic i Cenozoic, els límits entre els quals estaven fixats per grans extincions en massa de moltes espècies.

4.2.1.2. Els mètodes físics

Els fòssils indiquen antiguitats relatives, no pas absolutes. George Leclerc, comte de Buffon, fou l'iniciador de l'aplicació de mètodes físics a l'estudi de l'antiguitat de la Terra. Ho féu tot observant la velocitat de refredament d'esferes de ferro escalfades al roig. A partir de la relació entre el temps de refredament i el radi de les boles i de la hipòtesi que la Terra fou inicialment una bola de ferro fos, i fent algunes correccions per tenir en compte l'escalfament rebut del Sol, Buffon obtingué, en el volum de la *Histoire Natu-*

relle dedicat a les èpoques de la Natura, una edat de 74.832 anys. Altres autors adoptaren altres mètodes, com l'alentiment de la velocitat de la rotació terrestre, que indicà una antiguitat d'uns 56 milions d'anys; el contingut de sal en els oceans, suposant que inicialment l'aigua no era salada i que anaven acumulant sal a partir de l'arrossegada pels rius, que indicava una edat de 89 milions d'anys, o la velocitat de formació de capes de sediments. Lord Kelvin, a partir de les idees de Buffon i emprant mètodes matemàtics molt detallats a l'estudi del refredament de la Terra, arribà a una datació d'uns cent milions d'anys, el 1862, que després corregí a la baixa i situà en uns quaranta milions, el 1897.

Els errors dels mètodes citats anteriorment són molt diversos. El més freqüent és el de considerar que el procés té una velocitat constant, cosa que no és correcta. Pel que fa als mètodes tèrmics, l'error és perquè en aquella època no es coneixia l'escalfament radioactiu, que és una font de calor interna molt important per a la Terra. En el capítol tercer hem comentat com els rellotges basats en decaïment d'espècies radioactives han permès una mesura cada vegada més acurada de les edats de les roques i de la Terra.

Actualment sabem que l'edat de la Terra és d'uns 4.500 milions d'anys. Aquesta edat fou determinada per C. Patterson el 1956 mitjançant l'estudi de la radioactivitat de meteorits, en 4.550 milions d'anys, amb un marge d'imprecisió d'uns setanta milions d'anys. Les roques més antigues trobades a la Terra, a Groenlàndia i al Canadà, tenen tan sols uns 3.900 milions d'anys; en canvi, es pensa que l'edat d'aquests meteorits és com la de la Terra. Aquesta edat fou corroborada per l'anàlisi de roques portades de la Lluna, on no han patit cap alteració de les que pateixen les roques de la Terra a causa del dinamisme del planeta, i que tenen una edat d'uns 4.500 milions d'anys.

4.2.2. El temps i l'evolució

El pas d'una Terra d'uns cinc mil anys d'antiguitat a una de molt més vella fou importantíssim per a les ciències de la natura i obrí noves perspectives a la biologia. Les primeres modificacions del fixisme biològic les podem trobar en l'*Histoire naturelle* de Buffon i, sobretot, en l'obra de Jean-Baptiste de Monnet, cavaller de Lamarck, *Philosophie zoologique*, de 1809. Per al primer, els

fòssils representen espècies extingides: així, el dinamisme de la natura tindria només un sentit, el de decaïment i desaparició d'espècies creades inicialment, sense que tinguessin la capacitat de donar lloc a noves espècies. Lamarck trenca aquesta visió i proposa un transformisme segons el qual l'esforç de l'individu per adaptar-se a un medi exterior canviant provoca alteracions anatòmiques i funcionals, ja que l'ús o la manca d'ús provoca el desenvolupament o l'atròfia dels òrgans, i aquestes modificacions es transmeten als descendents, de manera que aquest procés duu, a la llarga, a una complexitat més gran del conjunt del vivent. Es tracta, doncs, d'unes modificacions finalistes, però que estableixen ja una relació entre les espècies fòssils desaparegudes i les actuals. Idees semblants foren defensades per Goethe, que en els seus estudis sobre la natura cercà la planta primordial d'on sortien totes les plantes, i que trobà l'os intermaxil·lar en els humans, os conegut en la majoria dels mamífers però d'observació difícil en els humans, i l'absència aparent del qual permetia sostenir, a alguns naturalistes, la separació entre aquests i els animals.

4.2.2.1. L'obra de Darwin

L'obra de Darwin *The origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, de 1859, suposà un canvi important en la manera d'interpretar l'evolució. Ací, les mutacions són a l'atzar i els canvis que provoquen fan que els individus siguin seleccionats en una lluita per la supervivència dels més aptes. Aquest punt de vista era molt més difícil d'acceptar que el de Lamarck: en el d'aquest, la transformació favorable era el premi a un esforç; en Darwin, era el resultat d'un atzar incontrollable, sense cap mèrit per part de l'individu, i imposat per la lluita amb els altres. Darwin, molt influït per l'assaig de Malthus sobre el creixement exponencial de la població, i per la situació socioeconòmica de l'Anglaterra victoriana, destaca tres punts principals: el creixement exponencial del vivent, que passaria a ocupar tot el globus terraqüi si alguna cosa no ho limités; la destrucció massiva del major nombre d'espècies, i el postulat que aquesta destrucció no és aleatòria, sinó que afecta principalment les menys adaptades al medi.

L'evolució introduí el temps en el fons de la biologia a escala de

les espècies. Posteriorment, quan hom comprengué els mecanismes moleculars de l'herència, el mecanisme d'evolució fou interpretat com la combinació de mutacions aleatòries en el DNA, les quals durién a canvis en el fenotip, és a dir, en la forma o funcionament d'òrgans dels individus, que serien seleccionats per l'ambient. Un increment d'eficàcia duria a més possibilitats de reproducció i amplificaria el canvi.

El temps de l'evolució no és lineal, sinó ramificat i turbulent: desaparicions lentes o sobtades, permanències d'espècies al llarg de milions d'anys... Ja hem comentat, en comparar els punts de vista de l'evolució segons Lamarck i Darwin, el paper de l'esforç i l'herència en el primer, i el de l'atzar i de la lluita competitiva en el segon. Ara bé, per a aquests canvis cal períodes temporals molt llargs. Per això, un dels problemes amb què topà Darwin fou la polèmica amb Lord Kelvin, que sostenia —com ja hem dit— que l'edat de la Terra no passava d'uns cent milions d'anys.

Un segon problema fou el desconeixement dels mecanismes de l'herència (ja que no coneixia els resultats de Mendel). En la seva visió, no resultava gaire clar com un canvi genètic es podia mantenir, en lloc d'anar-se diluint de generació en generació. Aquest problema no fou resolt fins a principis del segle XX, quan De Vries redescobrí els resultats de Mendel. En la genètica, els canvis no es van diluint, sinó que es conserven íntegrament, manifestant-se sempre si són dominants, o en una certa proporció d'individus si són recessius, però sense perdre's del tot.

Un tercer problema referent al temps es presentava pel fet que el segon principi de la termodinàmica, en la interpretació microscòpica de Boltzmann, afirma que els sistemes evolucionen vers el desordre, mentre que en l'evolució hi ha una tendència a augmentar la complexitat i l'ordre de les estructures. La incompatibilitat aparent entre la fletxa del temps evolutiva i la termodinàmica no quedà aclarida fins a la segona meitat del segle XX, tot advertint que els sistemes vius no són aïllats sinó oberts i que els sistemes allunyats de l'equilibri poden autoorganitzar-se en estructures complexes.

D'altra banda, interessa no sols l'aparició sinó també l'extinció de les espècies. L'extinció que més curiositat produeix és la dels dinosaures, de fa uns seixanta-cinc milions d'anys, però hi ha hagut quatre extincions massives: fa uns 440, 360, 220 i 65 milions d'anys, aproximadament. Algunes d'elles han suposat la fi de més del se-

tanta per cent de les espècies vivents. Hi ha hagut diverses hipòtesis sobre què les ha produïdes i si han estat un fenomen lent i gradual o un cataclisme, com ara la col·lisió d'un gran meteorit amb la Terra, i s'ha discutit quin paper han tingut aquestes grans extincions en el progrés biològic.

4.2.2.2. Debats actuals

Una qüestió actual es refereix al ritme de l'evolució. La idea de Darwin era un evolucionisme que actuava contínuament. De fet, es coneixien les dificultats d'establir, a partir de fòssils, una evolució continuada, ja que sovint mancaven fòssils que completessin la cadena evolutiva. La primera reacció fou atribuir-ho al nombre relativament escàs d'individus que queden fossilitzats i al nombre encara més reduït de fòssils que arriben a mans dels paleontòlegs. Així, aquestes discontinuïtats no indicarien necessàriament discontinuïtat en el ritme de l'evolució. El 1972, però, Eldredge i Gould i d'altres investigadors proposaren un model diferent, en què hi ha llargs períodes de calma i d'evolució relativament escassa, seguits per períodes de gran activitat evolutiva. Es tracta de la teoria puntualista de l'evolució. Algunes de les motivacions són l'aparent falta de fòssils nous en algunes èpoques, i la relativa abundància en altres etapes. Per exemple, els fòssils indiquen que durant sis milions d'anys els trilobites no manifestaren cap canvi i que, de cop, n'aparegueren noves espècies. Hom s'ha preguntat si en algunes circumstàncies el ritme de mutacions podria ser accelerat i en d'altres ser més lent. Això no és estrictament necessari per a la teoria puntualista: n'hi hauria prou amb què petites mutacions s'anesin acumulant sense canvis aparents en el fenotip i que, a partir d'un cert llindar, es presentessin conjuntament els seus efectes acumulats. O seria possible que els enzims de reparació del DNA deixessin d'actuar durant un període i això accelerés el ritme de mutacions.

Un altre debat se centra en quin és l'objecte de selecció: si gens, individus o poblacions. Naturalment, la selecció actua directament sobre els individus, però pot ser que seleccioni gens. Per exemple, Butler, cap al 1900, va escriure que «una gallina és un mitjà imaginat per un ou perquè sigui post un altre ou», idees que han donat lloc, més recentment, a teories sobre els gens com a protagonistes

de l'evolució que se serveixen dels individus per propagar-se. Podria ser, també, que algunes característiques poblacionals (dispersió territorial, variabilitat, etc.) poguessin afectar la supervivència d'una espècie, a nivell diferent de l'acció sobre els individus. La teoria neutralista de Kimura ha accentuat el paper de l'atzar en les mutacions neutres (ni beneficioses ni perjudicials) de molts gens, de manera que la selecció eliminaria les desavantatjoses i prou. Actualment hom pensa que la selecció actua, més que sobre gens separats, sobre grups de gens (anomenats *segments cromosòmics característics*) que actuarien conjuntament en l'individu. Per exemple, en la formació de l'ull o en el mecanisme de la coagulació de la sang hi intervenen molts gens alhora, de manera que algunes mutacions d'un sol gen són incompatibles amb les altres i fan l'individu inviable. En algunes ocasions hi ha canvis neutres, com ara l'aparició d'una cintura òssia en el peix celacant, que posteriorment, però, resultaria ser un avantatge per a poblar la terra ferma i passar a tenir cames. L'acumulació de mutacions d'aquesta mena pot fer semblar que de cop apareixen modificacions molt complexes, quan de fet s'anaven congriant des de feia milers d'anys.

4.2.3. *El DNA com a rellotge de la història biològica*

El DNA no és una entitat estàtica, sinó que experimenta mutacions i recombinacions que són el soroll de fons de l'evolució. Es creia que el nombre de mutacions aleatòries o d'errors de transcripció seria relativament reduït, però s'ha observat que és força més alt del que es pensava. Hi ha, però, uns enzims de reparació que van recorrent el DNA i que n'arrangen els errors, cosa que ens fa veure el DNA com una entitat dinàmica, impregnada de temps. El ritme de mutació observat fenotípicament pot ser molt inferior al que es produeix realment en el DNA: per una banda, si la proteïna considerada és molt sensible a variacions, els individus amb un error són eliminats ràpidament; per l'altra, hi ha enzims de correcció que esmenen els errors.

El ritme de mutacions varia segons els gens. Una de les proteïnes més estables són les histones, algunes de les quals són essencialment iguals des dels pèsols fins als humans. Els fibriнопèptids són algunes de les proteïnes que admeten més variacions, i el ritme de mutació dels seus gens s'apropa a la taxa mu-

tacional bàsica. El ritme de mutació en l'hemoglobina és intermedi entre el de les dues proteïnes esmentades. Conegut el ritme de mutació d'una certa proteïna, es poden fer servir els gens de diverses proteïnes de les diferents espècies com una mena de rellotge biològic que ens informaria sobre l'època d'aparició de les espècies en qüestió.

Si considerem que el ritme de mutacions en un gen determinat és constant, podem convertir la comparació de dos gens anàlegs de dues espècies diferents en una manera de mesurar el temps des que divergiren d'un antecessor comú. Aquest mètode fou utilitzat per primera vegada per A. Wilson i V. Sarich, de Berkeley, el 1967, quan van comparar una proteïna de la sang de micos africans i la d'éssers humans i van concloure que la separació entre els dos troncs era recent, de l'ordre d'uns cinc milions d'anys, en contrast amb les teories anteriors, que li atribuïen uns quinze milions d'anys. Els fòssils de prehomínids més antics coneguts per ara són les d'*Australopithecus afarensis*, que tenen una mica més de quatre milions d'anys.

Això obre noves possibilitats a la taxonomia comparada. La taxonomia clàssica (o ciència de la classificació de les espècies) es basa en característiques anatòmiques i embriològiques per determinar els parentius entre diverses espècies, i utilitza la geologia, en especial l'estratigrafia, per a efectuar les seves datacions. La taxonomia molecular, en canvi, estableix parentius tot seleccionant una proteïna determinada i comparant en quants aminoàcids difereix en dues espècies, i estableix el temps de separació entre elles segons la taxa de mutació característica del gen d'aquella proteïna. Així, hom pot establir uns arbres de la vida, el valor dels quals queda reforçat si hom utilitza quatre o cinc proteïnes diferents i l'anàlisi de totes elles duu a arbres molt semblants.

4.2.4. *Qüestions conceptuals*

El mecanisme darwinian, molt general, ha tingut repercussions en el pensament econòmic, social, religiós i artístic. Des del punt de vista econòmic i social, el liberalisme de la segona meitat del segle XIX hi veia una corroboració de les seves teories: cal deixar que es vagin produint assaigs i que els uns lluitin contra els altres, fins a trobar el més ben adaptat al mercat. Des del punt de vista

religió, hi hagué inicialment un rebuig frontal, especialment pel que fa a les interpretacions que pretenien trobar en l'evolució una explicació global de la realitat, deixant de banda l'acció de Déu, i especialment pel que fa a la creació dels humans, que en l'evolució són entroncats directament amb espècies anteriors. El *Syllabus* de Pius IX de 1864 contra el modernisme posà en el mateix sac l'evolucionisme biològic i el progressisme social. Posteriorment, l'evolució fou adoptada, però no en el seu sentit més estricte, com a dominada per l'atzar, sinó guiada per Déu. De fet, sant Agustí ja havia escrit una interpretació de la Creació en què desenvolupava el procés del Gènesi: «La producció d'éssers vivents només fou completa, al començament, en llur principi i llur causa, car Déu no va crear de cop tota la natura. Va donar a la terra i a les aigües, en treure-les del no-res, el poder de donar lloc, en l'època fixada, a tots els éssers destinats a viure-hi». En els anys seixanta, tingué una gran ressonància l'obra de Teilhard de Chardin, que donava una interpretació de progrés comunitari fins a un punt omega en què una noosfera, o conjunt de tots els individus amb capacitat de coneixement, convergiria en la solidaritat universal i transcendent.

Des del punt de vista de la filosofia, l'evolució ha estat també molt influent. Herbert Spencer acceptà l'evolució, però la interpretà com un desplegament de potencialitats ja existents, mentre que Bergson, a *L'évolution créatrice*, considerà que *duració* significa invenció, elaboració contínua de coses absolutament noves. Des del punt de vista de la creació artística, hom pot imaginar que la ment recull nombroses mutacions o variacions d'alguna idea, i selecciona després la que més convé per als propòsits de l'artista: en altres paraules, la combinació d'una mena d'automatisme cec —el procés preconitzat pels surrealistes— amb una etapa de selecció i rigor.

4.3. EL TEMPS DESTRUCTOR: L'ENVELLIMENT

L'increment d'edat de la població a mesura que augmenta l'esperança de vida gràcies als avenços mèdics ha fet que cada vegada hi hagi més estudis sobre els processos d'envelliment, i que el seu tractament susciti un interès creixent i sigui un camp de recerca més i més reditiós. L'envelliment és el fenomen biològic en què el

pas del temps es manifesta amb més cruesa en molts éssers vius, especialment en els mamífers. Tot i que ens hem acostumat a veure, més o menys impotents, el fenomen de l'envelliment, i que hi ha hagut tants intents, sovint desesperats, d'assolir una joventut perpètua, el fenomen de l'envelliment no és l'única possibilitat biològica respecte del pas del temps. Alguns animals presenten pocs símptomes de senescència fins molt poc abans de morir: per exemple, els salmons del Pacífic o algunes rates marsupials d'Austràlia mantenen un molt bon estat físic fins al moment de l'aparellament; poques setmanes després, tots els mascles envelleixen ràpidament i en un període molt curt moren tots. Altres espècies (pins, musclos, alguns peixos) no semblen envellir, sinó que acostumen a morir per causes externes.

Una manera de comparar l'envelliment de les diverses espècies és estudiar com augmenta la probabilitat de morir a mesura que avança l'edat. En els humans, la probabilitat es multiplica per dos cada vuit anys d'augment de l'edat, a partir dels trenta anys. Així, una descripció aproximada del procés d'envelliment podria ser una primera etapa amb un augment pràcticament nul de la probabilitat de morir, ja que mentre hi ha creixement no hi ha envelliment, fins que a partir d'una certa edat la probabilitat de morir es va multiplicant per dos cada cert període o semivida característic de l'espècie.

La ineluctabilitat de la mort és un dels grans temes de la filosofia. Els humans som l'única espècie que sap que ha de morir. Això dóna al nostre sentit del temps una profunditat especial i essencial i sentim com una injustícia haver de morir. Potser des del punt de vista de l'espècie, seria més injust que els individus arribessin a la immortalitat o a una vida llarguíssima, ja que això faria reduir el nombre de vides noves. Però fins i tot acceptant la mort, ens revolta l'envelliment, amb la minva de recursos vitals i l'increment d'incomoditats que suposa. Per això voldríem conèixer millor com i per què es produeix, què en determina el ritme, i fins a quin punt podríem mitigar-ne els efectes.

Cal tenir en compte que l'increment d'esperança de vida vol dir, sobretot, que hi ha menys gent que mor jove, més que no pas que l'edat màxima hagi augmentat. L'edat màxima de vida no sembla haver variat gaire en el darrer segle, tot i que és major el nombre de persones que s'hi atansen. Per ara, l'edat màxima ben documentada és de 122 anys i mig, tot i que en alguns llocs hi ha persones sense documents que afirmen tenir edats superiors.

Els estudis sobre els temes de l'envelliment tenen lloc a tres nivells: cèl·lules, teixits, i òrgans, i tenen en compte diversos efectes. Sembla clar que no hi ha una sola causa, sinó la contribució de diverses causes que actuen sinèrgicament. Les més estudiades són: un hipotètic programa genètic que dugui a la mort; les alteracions fortuïtes del DNA o d'enzims; canvis hormonal; el declivi del sistema immunitari. En aquest apartat n'analitzarem algunes teories.

TAULA 6. Algunes característiques de l'envelliment.

Disminucions

Control de glucosa en la sang; fecunditat, reparació DNA, immunitat, capacitat d'aprenentatge, massa muscular, síntesi de proteïnes, enfocament visual, rapidesa de resposta, termoregulació.

Augments

Enredament permanent de proteïnes, producció de radicals lliures en mitocondris, lesions oxidatives hístiques, enduriment de les venes.

Malalties

Alteracions autoimmunitàries, càncer, cataracta, diabetis, hipertensió, insuficiència renal, arterioesclerosi, Alzheimer.

4.3.1. *La mort i els gens*

Cap a finals dels anys cinquanta es posaren de moda les teories que relacionaven l'envelliment amb els gens, com si hi hagués una programació per a eliminar els individus un cop arribada a una certa edat. Efectivament, alguns microorganismes són pràcticament immortals, en el sentit que es poden dividir indefinidament sense morir. Això passa, per exemple, en les amebes, o també en alguns organismes pluricel·lulars, com les hidres d'aigua, que en lloc de morir es dupliquen. La majoria d'organismes pluricel·lulars, però, envelleixen i moren.

Una teoria és que l'energia fisiològica es reparteix entre la reproducció (cèl·lules germinals) i el manteniment del cos (cèl·lules somàtiques). Com que els organismes pluricel·lulars necessiten més esforç reproductiu, això explicaria que els quedés menys energia per mantenir el cos. Kirkwood proposà, cap al 1990, una explicació dels avantatges de la mortalitat per envelliment. Suposem una

població d'individus que no envellissin, però que morissin a causa d'accidents o devorats per altres espècies. Imaginem que en alguns d'aquests individus es produís una mutació que els fes dedicar menys energia al manteniment de les cèl·lules somàtiques i més a la reproducció, al preu d'envellir i morir a una edat, però comparable a la vida mitjana de l'espècie, limitada pels accidents. Aquest individu tindrien més descendència —si la seva fertilitat decreixés poc amb l'edat— i aquests gens s'imposarien. Al cap d'un temps, la majoria de la població envelliria i moriria.

Així, és plausible que el DNA dels organismes pluricel·lulars estigui programat per a l'envelliment; no tant per a provocar la mort de l'individu com per descurar el manteniment —per exemple, podria produir menys enzims de correcció d'errors, o menys enzims antioxidants— i anar acumulant errors. Si féssim la comparació amb cotxes, podríem dir que no tenim programada una bomba de rellotgeria que destrueixi el cotxe en arribar a un cert nombre d'anys —és a dir, no hi ha un gen dedicat a produir la mort—, sinó més aviat una falta de defenses contra el rovell, les esquerdes i altres desperfectes químics i mecànics —o, en el nostre cas, a desgavells genètics i metabòlics. La mort dels individus en edat no reproductiva és compatible amb l'evolució, ja que aquesta selecciona els gens que no resulten letals abans de la maduresa sexual, de manera que els gens que actuen abans provoquen la seva pròpia desaparició a la llarga. En canvi, els gens que actuen en etapes posteriors no tindrien problema evolutiu, i menys encara si suposessin algun avantatge en l'etapa reproductora. Fins fa molt poc, la majoria d'humans no han sobreviscut gaire a l'etapa reproductora, ja que han mort relativament joves, de manera que la nova situació en què més gent arriba a edat més avançada ens pot descobrir perspectives biològiques inèdites.

Els estudis sobre envelliment cel·lular s'iniciaren el 1907, amb els treballs de Ross Harrison, que feia cultius cel·lulars de neurones fora de l'organisme; el 1912 Alexis Carrel amplià aquests estudis, fent cultius de cèl·lules del cor d'embrions de pollastre, que semblaren indicar que, fora del cos, les cèl·lules es reproduïen indefinidament. Això fou desmentit a principis dels anys seixanta per Leonard Hayflick i Paul Moorhead, que cultivaren cèl·lules (fibroblasts, sobretot) extretes de diversos teixits, n'estudiaren les duplicacions i constataren que hi ha un límit en el nombre de vegades que una cèl·lula pot arribar a duplicar-se. Aquest límit varia amb

les espècies, i té poca variació en les cèl·lules d'una mateixa espècie. El límit de Hayflick és d'unes cinquanta o seixanta duplicacions en l'espècie humana (en nens, i només unes vint o trenta vegades en adults de setanta anys), unes quinze duplicacions en els ratolins, i unes vuitanta en les tortugues. Hi ha espècies que, tot i viure menys temps, tenen més duplicacions: les cèl·lules del gat poden dividir-se fins a noranta vegades. Així, sembla clar que les cèl·lules tenen un cert rellotge biològic que imposa un màxim a l'edat abastable per l'individu. En canvi, les cèl·lules germinals i les canceroses depassen àmpliament el límit de Hayflick, i són virtualment immortals. Aquest factor d'envelliment cel·lular fa que la durada de la vida humana estigui limitada a uns cent vint-i-cinc o cent trenta anys. Un factor d'envelliment fou descobert el 1985 per Lumpkin: és una molècula especial de RNA que, injectada en les cèl·lules joves, fa que envelleixin molt ràpidament perquè produeix una proteïna que inhibeix la producció de DNA.

A finals dels anys seixanta, Barbara McClintock i Hermann Muller observaren, la primera en blat de moro i el segon en *Drosophila melanogaster*, que en els extrems dels cromosomes hi ha unes parts especials, anomenades *telòmers* (part final) per Muller, que impedeixen que els cromosomes s'enganxin entre si. El 1978 se'n va determinar l'estructura: en els humans és TTAGGG repetit unes dues mil vegades. Aquesta seqüència no és codificant, però té un paper decisiu en el DNA, i es troba en molts altres organismes, fins al punt que hom creu que és anterior a l'època dels dinosaures. A principis dels vuitanta es va constatar que el nombre d'unitats variava amb les cèl·lules d'un mateix organisme, i que en els descendents d'una mateixa cèl·lula es va reduint en les duplicacions: en efecte, a cada duplicació del DNA es perd un fragment de telòmer, i el límit del nombre de reproduccions s'assoleix quan aquests s'exhaureixen completament. La reducció de la longitud dels telòmers en la reproducció és deguda al fet que les polimerases que copien el DNA no poden copiar la part final de la cadena.

En alguns casos, però, es manté la longitud dels telòmers gràcies a l'acció de la telomerasa, un enzim descobert el 1984 per Greider i Blackburn, que afegeix a la cua dels telòmers les unitats perdudes. Cèl·lules tractades amb telomerasa depassen moltes vegades el límit de reproducció de Hayflick. Les cèl·lules de la línia germinal, és a dir, relacionades amb la reproducció, tenen sempre telomerasa, mentre que en les cèl·lules somàtiques, un cop l'organisme

s'ha acabat de formar, desapareix la telomerasa i comença el compte enrere cap a la fi. En principi, una manera d'evitar l'envelliment podria ser un tractament amb telomerasa per tal d'aconseguir que el telòmer no s'escurcís. Això suposa, però, un altíssim risc de càncer ja que les cèl·lules canceroses es reproduïen indefinidament: en això rau precisament el seu perill.

Una de les preguntes és com el cos indica als gens que ja és prou vell: és el resultat d'una acumulació de substàncies químiques? o d'un exhauriment de substàncies? Més aviat es tracta d'una acumulació de desperfectes que van multiplicant la seva acció, i que poden consistir no sols en mutacions no reparades en el DNA, sinó en errors en l'activació de gens o en la fabricació de les proteïnes en el ribosoma.

Comentem, finalment, que hom ha trobat alguns gens que provoquen el suïcidi en les cèl·lules que han perdut la capacitat de control. Aquests gens constitueixen una defensa contra els tumors, però de vegades queden desbordats i no els poden impedir. El suïcidi cel·lular (apoptosi) té un paper important en alguns processos d'embriogènesi: per exemple, l'espai que separa els dits ha estat produït com a conseqüència del suïcidi cel·lular de les cèl·lules que inicialment els unien.

4.3.2. *Radicals lliures*

El 1950, D. Harmon proposà que els radicals lliures són la causa de l'envelliment. Aquests són molècules amb electrons lliures, com ara el grup carbonil o l'aigua oxigenada, que tenen un poder elevat d'oxidació: en lloc de tenir dos electrons en un orbital només en tenen un i busquen arreu l'electró que els falta: són, doncs, inquiets i reactius. Però el problema no s'acaba aquí: la molècula a la qual prenen l'electró esdevé al seu torn un radical lliure i així successivament, cosa que en prolonga la capacitat d'acció. Els lípids insaturats són un exemple de molècules que formen fàcilment radicals lliures i fan que la membrana cel·lular perdi fluidesa. Els radicals lliures poden modificar el DNA (unes deu mil bases per DNA i dia, però la majoria són reparades), oxida les proteïnes i incrementa la producció d'enllaços entre macromolècules biològiques. No tots els radicals lliures són igualment perjudicials: l'hidroxil és molt perillós; d'altres, com l'òxid nítric, tenen alguns

efectes beneficiosos com a intermediaris d'algunes reaccions importants. Alguns enzims eliminen radicals: la superòxid dismutasa, que converteix el superòxid en peròxid, la catalasa, que converteix el peròxid en aigua, i d'altres com la glutació-peroxidasa i les vitamines C i E.

Els radicals lliures es produeixen sobretot en els mitocondris, quan alguns electrons surten de la cadena d'oxidació-reducció i es combinen amb l'oxigen del voltant, el qual es torna molt oxidant i pot atacar enzims, proteïnes diverses o en particular el DNA mitocondrial, el qual no està protegit com el DNA cel·lular per histones ni té un sistema d'enzims de reparació. Dintre la cadena d'oxidació-reducció dels mitocondris, responsables de la fosforilació oxidativa, l'enzim citocrom c oxidasa és l'encarregat de donar a l'oxigen els electrons que sobren del procés i convertir-lo en aigua. Una sola molècula de citocrom c oxidasa pot arribar a formar fins a un miler de molècules per segon. L'últim pas del procés, en què l'oxigen es converteix en aigua, és el més delicat, perquè en la molècula d'oxigen cadascun dels àtoms té un electró desaparellat, habitualment en el mateix estat. Per això, la molècula d'oxigen és poc reactiva (com a conseqüència del principi d'exclusió de Pauli). La citocrom c oxidasa força l'acceptació d'electrons per part de l'oxigen, però si el procés no funciona bé, i en lloc d'agafar dos electrons només n'agafa un, es converteix en superòxid. La producció de radicals lliures té relació amb el ritme metabòlic; si és elevat, hi ha molta producció de radicals lliures i l'envelliment és més ràpid. Com que els radicals afecten el DNA mitocondrial, els mitocondris perjudicats serien menys eficients i produïrien encara més radicals lliures, cosa que multiplicaria els efectes de la degradació.

La manera de combatre els radicals lliures són els antioxidants, que els poden donar l'electró que els falta sense esdevenir ells mateixos radicals lliures. En les parets dels mitocondris, per exemple, hi ha molta vitamina E, un antioxidant poderós que es troba en abundància en els cítrics. En mosques i cucs, hom ha estudiat quines diferències hi ha entre els individus longeus i els d'envelliment normal. Una de les diferències és, precisament, que els primers tenen varietats més actives d'enzims antioxidants. Un antioxidant relativament efectiu contra l'envelliment és la melatonina, produïda per la glàndula pineal durant els períodes de fosc, i que és un segrestador important de radicals lliures. La melatonina incrementa la longevitat de ratolins i en retarda la senescència i si el període

llum-fosca és 24 hores, la longevitat assolida és màxima. Podria ser que l'envelliment fos accentuat per la disminució en la producció de melatonina a mesura que augmenta l'edat.

Als anys trenta, uns experiments de C. MacKay amb ratolins indicaren que un consum calòric baix allarga la vida: en concret, observà que una disminució d'un trenta per cent de les calories allargava la vida en un trenta per cent. Recentment hi ha hagut molts més experiments, amb diversos animals, que posen de manifest com una reducció en la dieta allarga la vida i retarda l'envelliment. Durant molt de temps s'ignorà si això es deu a la reducció en calories o a la minva de greixos o d'algun altre producte. Avui es creu que el primer factor és el més important, i que un dels possibles llocs on actuaria aquesta dieta seria en la reducció de la producció de radicals lliures pels mitocondris. R. Weindruch i R. L. Walford han realitzat experiments amb primats, que indiquen que les restriccions calòriques no alteren pròpiament el ritme de declivi fisiològic ni modifiquen el temps de duplicació de la tasa de mortalitat (vuit anys, en els humans), sinó que retarda l'edat en la qual les tases de mortalitat augmenten exponencialment (uns trenta anys, en els humans).

4.3.3. *Envelliment de teixits i d'òrgans*

Altres teories sobre l'envelliment l'atribueixen al cos en conjunt, més que no pas a les cèl·lules que el formen. De fet, quan el cos mor, moltes de les cèl·lules no han arribat encara al límit de Hayflick, però no cal que totes elles hi hagin arribat: si una part de l'organisme ha sofert moltes lesions, envelleix més ràpidament. Per exemple, les parets de les artèries i les venes s'endureixen, els ossos absorbeixen menys calç i perden massa (osteoporosi), el cristal·lí perd transparència...

Algunes teories dedicades a factors no cel·lulars de l'envelliment l'atribueixen a l'increment del nombre d'enllaços entre macromolècules, especialment en el col·lagen i l'elastina del teixit conjuntiu. Aquest increment provoca també l'envelliment de materials no biològics, com per exemple els plàstics i el cel·luloide de les pel·lícules, que amb el temps es torna fràgil i dur. Aquesta producció d'enllaços es veu incrementada per la presència de radicals lliures i de glucosa i provoca una pèrdua d'elasticitat que endureix la

pell —que es va arrugant—, el teixit conjuntiu, el miocardi, els músculs que enfoquen l'ull, el teixit dels pulmons.

Altres teories es basen en l'envelliment d'alguns òrgans o sistemes essencials. S'ha estudiat amb especial interès el sistema pituïtària-tiroides i el sistema immunitari. La raó d'estudiar la relació amb el tiroides és que aquesta glàndula, que segrega la tiroxina, regula el creixement, durant el qual no hi ha envelliment (tret de casos patològics com la progèria). Si l'activitat tiroidea és escassa, desencadena diverses característiques de l'envelliment (emblanquiment dels cabells, aparició d'arrugues a la pell) que es corregeixen amb injecció de tiroxina. Tot i això, aquest remei és poc eficaç i la relació no és clara, ja que la majoria de la gent envelleix malgrat que té un nivell satisfactori de tiroxina. Podria ser, però, que l'organisme anés perdent la capacitat de fer-la servir, malgrat tenir-la en quantitats suficients, degut a que la pituïtària fabriqués a partir de certa edat alguna substància que en dificultatés l'assimilació però no la producció.

Pel que fa al sistema immunitari, encarregat de la defensa contra agressions exteriors, presenta amb l'edat dos canvis principals: es torna menys eficaç i defensa pitjor i, en segon lloc, augmenta les reaccions autoimmunitàries, és a dir, ens ataquem nosaltres mateixos. Efectivament, com que els detectors d'antígens de què estan dotats els leucòcits *T* és aleatori (vegeu l'apartat dedicat a la memòria immunitària) sempre n'hi ha que reconeixen en el propi cos un enemic, i l'organisme se n'ha de defensar tot eliminant-los o desactivant-los. Aquest procés d'autodefensa també disminueix amb l'edat. M. Burnett, premi Nobel pels seus estudis sobre immunologia, sosté que el sistema immunitari pot ser el responsable de molts dels símptomes de l'envelliment: arterioesclerosi i hipertensió, per exemple.

També el cervell queda afectat per l'envelliment. Amb l'edat, l'agilitat mental decau i la memòria s'afebleix: a partir dels 25 anys moren unes 10.000 neurones diàries, i a partir dels 40, unes 100.000, i els seus detritus romanen, en bona part, en el mateix cervell. Aquesta destrucció queda compensada, si més no en part, per la formació de nous nexos o sinapsis entre neurones. Així, bona part de l'envelliment cerebral sembla ser no d'origen neuronal, sinó degut a petits accidents vasculars.

4.3.4. *Esperança de vida en homes i dones*

La diferència de l'esperança de vida en homes i dones és notable i sistemàtica, d'uns sis o set anys a favor d'aquestes darreres, en els països desenvolupats (la diferència arriba a vuit anys als Estats Units). Segons alguns autors, però, les diferències elevades no s'han presentat sempre, sinó que són característiques del nostre temps. Fa segles, la vida mitjana de les dones era més curta que la dels homes, per les males condicions dels parts i potser per això l'esperança de vida de les dones s'ha allargat més que la dels homes.

De fet, la mortalitat dels nois és sempre superior. Tot i que hi ha un cinc per cent de més de naixements de nens que de nenes, a vint-i-cinc anys ja hi ha més dones que homes; i a partir de vuitanta-cinc anys, hi ha el doble de dones que d'homes. Hi ha una lògica biològica en aquest fenomen? Hi ha algunes característiques que sembla que fan que això sigui possible: les hormones sexuals femenines intervenen en el nivell de colesterol i redueixen les malalties cardiovasculars; el ritme metabòlic de la dona és un deu per cent inferior al de l'home, cosa que suposa menys producció de radicals lliures. D'altra banda, els nois tenen uns comportaments de risc més elevat, que en provoquen una mortalitat força més elevada que les de les noies en la joventut.

4.3.5. *Qüestions conceptuals*

L'allargament de la vida és alhora un èxit de la medicina i un problema social: mercat de treball, vivenda, transport, seguretat social, medicina, queden afectats per les modificacions dràstiques de la piràmide d'edat de la població. Alguns dels problemes que planteja l'envelliment són semblants als del creixement demogràfic per increment de natalitat, però és força diferent, en canvi, pel que fa a malalties. El primer demana un control de les malalties infeccioses i parasitàries i el segon el de malalties degeneratives com cardiopaties, malalties cerebrovasculars i càncer. Segons la relació entre el límit superior de l'envelliment i el límit inferior de la mortalitat, la forma de la piràmide d'edats serà diferent.

Actualment hi ha un gran interès a cercar medicaments que retardin l'envelliment. Els temes que hem tractat suggereixen maneres d'allargar la vida: l'ús de la telomerasa; tractaments amb oxi-

dants diversos contra els radicals lliures; implantaments de neurones que podrien guarir algunes malalties cerebrals que ocasionen degeneració cerebral... Tots aquests tractaments presenten, però, riscos greus de produir efectes oposats als desitjats, com per exemple estimular tumors. No hi ha indicis d'una esperança de vida gaire superior als noranta anys ni d'una vida individual màxima superior als cent vint-i-cinc anys.

El debat ha vist obrir-se noves perspectives amb l'explotació de cèl·lules mare o amb la clonació i la possibilitat d'obtenir cèl·lules del mateix individu capaces de reparar desperfectes fins ara irreparables. Un dels debats bioètics més freqüents es refereix a la possibilitat de morir en bones condicions, en lloc d'envoltat de dolor i de demència. És un debat en què influeixen molt les creences religioses, els costums, la por davant el risc d'aplicacions abusives... En tot cas, hi ha una oposició creixent a la prolongació artificial de la vida en condicions vegetatives o doloroses.

Pot sorprendre que l'envelliment pugui afectar de manera diferent cèl·lules, teixits i òrgans, si aquests darrers estan constituïts per cèl·lules. El temps, en efecte, pot passar de manera diferent per als individus que per a la societat. Per exemple, podríem tenir una societat d'individus molt joves, però amb una estructura social arcaica, poca imaginació creativa o baixa ambició reproductiva. Tot i que els individus serien biològicament joves, la societat seria envellida i arcaica. Una cosa semblant pot passar amb els organismes: unes cèl·lules joves poden veure limitades les seves possibilitats per unes connexions endurides o ineficients.

4.4. CONCLUSIONS

El temps biològic és el que més sentim, i el veiem amb dues facetes principals: creadora i destructora. La vida ens va donant ocasions de realitzar-nos, de construir-nos, d'enriquir-nos amb noves obres i experiències però, alhora, flueix i se'ns escapa irreversiblement. Aquestes dues sensacions són viscudes amb una intensitat que varia segons els moments i que és el tercer aspecte del temps a què ens hem referit: el dels ritmes multifacètics i la percepció variable.

Hem constatat el gran nombre de ritmes biològics i algunes de les seves relacions i sintonies, i l'interès creixent que suscita aquest

aspecte dinàmic de la vida, tant en medicina com en ciències naturals. Hem subratllat l'existència d'una mena de quàntum temporal elemental de la consciència, de l'ordre d'una vintena de mil·lsegons, que fa pensar en el quàntum temporal suggerit pel temps de Planck en física (que és, però, incomparablement més breu que el biològic). Aquest quàntum hauria plagut a Bergson i Husserl, per als quals el temps intern del present vivencial no és instantani, sinó que ha de trobar-se en la durada per tal de percebre i tenir consciència del canvi: tot i que la mecànica insisteix en l'esdeveniment pur, la biofísica evidencia la plausibilitat d'aquesta visió de durades elementals.

La noció d'un temps creador a gran escala, d'un Univers dotat de la capacitat d'explorar noves formes de vida és potser el que més impacte cultural ha tingut entre els temes que hem tractat, i que hem comentat, en part, a les conclusions de l'apartat corresponent. A finals del segle XIX, la fe en el progrés dugué a veure l'evolució com un corelat natural a gran escala del progrés, com una fletxa temporal ascendent des de la cèl·lula primitiva (o potser des de la matèria inanimada) fins als humans (i potser més enllà).

Una qüestió en debat és si l'evolució és assimilable al progrés. Hi ha, certament, una tendència a l'augment de complexitat del desenvolupament i del grau d'integració per augmentar la capacitat d'explorar ambients nous i independitzar-se del medi. Hi ha manifestacions de tendència «progressiva», una successió ascendent amb el pas d'evolució molecular a cel·lular procariota, i d'aquesta a la cel·lular eucariota, a l'individu pluricel·lular no sexual i a l'individu pluricel·lular sexual; i, pel que fa al sistema nerviós, una progressió des d'organismes sense neurones fins a d'altres amb neurones no connectades, amb neurones connectades i coordinades, a individus amb cervell, i un desenvolupament del cervell que li permet funcions cada vegada més abstractes. Tot i això, en una etapa com l'actual, molt recelosa sobre la idea de progrés, som més conscients de les ramificacions i turbulències del flux del temps evolutiu.

Pel que fa a la destrucció de l'envelliment i de la mort, hem vist que hi ha una lògica biològica que fa que la mortalitat sigui relativament beneficiosa per a les espècies. Això xoca contra la idea de la mort com a càstig diví —càstig que, en tot cas, consistiria en què els humans sabem que morirem, de manera que, en aquest sentit, el coneixement suposa efectivament el càstig de la consciència de mortalitat. Així, hem vist que el caràcter creador de la vida, basat en

les mutacions aleatòries i en la selecció, implica també un dinamisme que pot resultar causa de mort en l'individu: és el cas del càncer, que provoca la mort, però que consisteix en una explosió de vitalitat incontrolada i irrefrenable que esdevé invasiva.

Parlar d'immortalitat està fora del nostre abast. Tot i això, la clonació, l'enginyeria genètica i la cirurgia obren camí a moltes noves possibilitats de reparació, que ens porten a preguntar-nos si els individus prou rics per poder-ne sostenir la despesa podrien aspirar a viure un temps molt llarg. La fe en aquestes possibilitats fa que algunes persones prou riques facin conservar el seu cadàver congelat, per tal d'intentar recuperar la vida en un futur en què la medicina hagi trobat la manera de solucionar els desperfectes que els provocaren la mort.

Més que aquests esforços relativament patètics, sembla més savi reflexionar més profundament sobre la mort i acceptar-la com una part del procés vital. Va bé, per això, acudir a les reflexions acumulades per les grans religions, per la poesia i la filosofia, que han reflexionat sobre la mort i la possibilitat d'una immortalitat de l'ànima en un altre món hipotètic. En podem aplegar com a testimonis algunes frases conegudes. El poeta llatí Lucreci deia «Si has perdut l'infinit passat que hi ha rere teu, per què et preocupa perdre l'infinit futur que tens al davant?». Borges escrivia: «Tenemos muchos anhelos, entre ellos el de la vida, el de ser para siempre, pero también el de cesar... Yo personalmente no la deseo (la inmortalidad) y le temo; para mí sería espantoso saber que voy a continuar, sería espantoso pensar que voy a seguir siendo Borges». Per a Albert Camus, si el valor d'un instant és infinit, és innecessari viure infinits instants, de manera que cal traslladar les preocupacions per la immortalitat futura a l'increment de la intensitat de vida present. Victor Hugo ironitzava: «El dolent de la immortalitat és que cal morir per arribar-hi». Els materialistes epicuris van veure en el no-res de després de la mort una font de pau i serenitat. En el cristianisme, pensem que Déu va crear el món per amor i que aquest amor farà que, d'una manera o altra, ens salvi d'un no-res etern.

CONSIDERACIONS FINALS

És hora d'assajar una recapitulació del que hem exposat en aquest llibre. El seu títol fa pensar en una oposició radical entre permanència i canvi, o entre memòria i temps. La panoràmica que hem presentat, però, sembla suggerir que aquesta dualitat queda mitigada a la pràctica per una gradació contínua entre aquests dos pols aparents, i per una àmplia multiplicitat de visions que en difuminen l'oposició. Reflexionarem breument sobre aquestes dues perspectives.

a) La gradació entre el temps i la memòria

L'exemple de la termodinàmica pot resultar útil per a il·lustrar què volem dir en parlar de gradació. Reversibilitat i irreversibilitat semblen conceptes antagònics. Ara bé, la termodinàmica introdueix procediments per a avaluar el grau d'irreversibilitat, basats en el ritme de producció d'entropia. Si en un interval de temps determinat l'augment d'entropia de l'Univers és gran, el procés és molt irreversible; si tendeix a zero, el procés tendeix a ser reversible; la reversibilitat és un cas límit en què la producció d'entropia és nul·la. En aquesta visió, reversible i irreversible, no constitueixen una polaritat distant, sinó tot un continu de gradacions.

L'exemple termodinàmic adduït depassa el marc de l'especialització si tenim en compte que l'entropia està relacionada amb la informació. Hem comentat —en l'apartat 3.4.4— l'enorme diferència que hi hauria entre dues descripcions de l'Univers —o de qualsevol altre sistema— si en una donem prioritat al temps lineal

mesurat pels rellotges —és a dir, si a cada unitat de temps li assignem el mateix espai en un llibre— i en l'altra donem prioritat a la informació, que fa que algunes unitats de temps necessitin molt de detall de descripció, perquè són riques en esdeveniments, mentre que d'altres unitats temporals són gairebé irrellevants, perquè no hi passa res de nou.

Potser la cultura actual ha donat massa crèdit al temps indicat pels rellotges, com si expressés la realitat més profunda, i ha negligit —per excessivament subjectiu i difícil de mesurar— el temps biològic, psicològic i històric, que presenta moments crucials de gran densitat i etapes buides i anodines. Potser les possibilitats que obren la termodinàmica i la teoria de la informació a un cert grau de quantificació ajudaran, en el futur, a donar més pes a aquestes avaluacions temporals i a relativitzar el temps mecànic dels rellotges.

D'altra banda, hem vist que la permanència o la memòria no són, en general, característiques estàtiques. Les estructures dels organismes vius exigeixen una aportació constant d'energia per tal de poder-se mantenir. La conservació de les memòries biològiques —genètica, neuronal i immunitària— demana una acció continuada d'enzims correctors que defensin el DNA d'un ritme excessiu de mutacions, de les bombes de sodi i de potassi que mantinguin la potencialitat de les neurones per transportar potencials d'acció, i una autodefensa contínua del cos contra els limfòcits que, per l'atzar de la seva formació, identifiquin les cèl·lules pròpies com a invasores que han de ser destruïdes.

Anàloga a la gradació entre reversibilitat i irreversibilitat, és la que hem trobat entre determinisme i indeterminisme en la física quàntica i la teoria de l'evolució. En la primera, el pas de sistemes microscòpics a macroscòpics atenua la diferència i fa passar de l'indeterminisme quàntic al determinisme clàssic. En la teoria de l'evolució, l'atzar de les mutacions i les recombinacions es combina amb el determinisme de la selecció natural com a mecanisme de producció d'espècies noves. També la nostra activitat psíquica i la nostra llibertat semblen tenir components d'aleatorietat i de necessitat, i ser el fruit conjunt de circumstàncies fortuïtes i de l'obstinació de la voluntat.

Aquestes combinacions ens poden ajudar a copsar alguns dels elements definitoris de la vida, vista com a procés amb provatures moleculars que poden donar lloc a millores o a empitjoraments, amb necessitat de manteniment continu. L'envelliment i el càncer

en són conseqüències nefastes per a l'individu; l'aparició d'estructures biològiques més perfeccionades per a determinades funcions és l'aspecte positiu, a més gran escala. Per això, la visió del temps i de la memòria depèn de l'escala de referència, de manera que hi ha nivells diferents de temporalitat, segons que ens referim als àtoms aïllats o al conjunt de molts àtoms; a l'individu o a l'espècie; a l'Univers o a les partícules elementals. La doble presència cultural d'una temporalitat sagrada i una de profana és una altra manifestació d'aquesta multiplicitat de nivells temporals, en el domini de la cultura. Voler reduir el temps a una sola de les seves manifestacions és probablement empobridor i no ajuda a la comprensió de la seva complexitat.

b) La multiplicitat del temps i de la memòria

La impressió més immediata que produeix aquest llibre és la de multiplicitat de visions del temps i de la memòria. Haver-hi aplegat alhora física i biologia ens ha permès d'insistir en aquesta multiplicitat. No hi hem enfrontat, doncs, un temps únic i ben definit contra una permanència absoluta i unívoca, sinó dues realitats difuses i proteïques.

Sentim una doble sensació de desbordament, tant pel que fa a la memòria com al temps. Som conscients d'alguns records i desigs, però que n'hi ha de memòria que no sabem i que ens influeix! Freud ja havia fet aflorar el paper del subconscient i la seva vida secreta. Però hem vist que, a més del món neuronal, som també memòria genètica i immunitària —el DNA que marca les cèl·lules des del naixement fins a la mort; el rebuig immunitari al no-jo. La ciència ens ha ensenyat, també, maneres de trencar aquest jo: de superar barreres immunitàries, de modificar —a la llarga— alguns gens malignes, d'intervenir amb neurofàrmacs en les nostres ansietats. La identitat, tant la feta de memòria com la feta de projectes, ha experimentat grans trencaments tecnològics que plantegen cries urgents a la reflexió ètica.

Hem parlat de temps creador i destructor, reversible i irreversible, predictable i imprevisible, regulador i caòtic, còsmic i psicològic, d'allargament de l'esperança de vida i de problemes de l'envel·liment... Aquesta multiplicitat ens fa comprendre la dificultat d'assajar-ne una definició i ens revela la seva riquesa calidoscòpica.

Alhora, en examinar passat i futur, descobrim la profunditat temporal dels gens i dels àtoms. En aquests, la història remota de fusions nuclears en estrelles que explotaren. En els primers, els temps de la vida en el DNA, les provatures mancades de les quals potser trobem el rastre en la part no codificant, tan abundant en els mamífers. I tot i això trobem, tant en els gens com en els àtoms, uns desbordaments sorprenents: en l'Univers, la massa de la matèria coneguda sembla ser només el deu per cent de la massa total. En el DNA dels humans, només el cinc per cent codifica proteïnes i ignorem el paper de la resta. Paradoxalment, ara que som més conscients del pes de la temporalitat en l'Univers i la vida, provoquem una de les extincions en massa més importants de la història i semblen eliminar la profunditat del passat, tant en la visió postmoderna de la cultura —on tot el passat està present, però com una combinatòria sense perspectiva ni profunditat— i en la pràctica de la ciència —que oblidia la trajectòria històrica i només viu en el present de les teories actuals.

Pel que fa al futur, el paradigma del progrés ha sofert una crisi considerable, tant des del vessant tecnocientífic com del politico-ideològic. En el primer, hi ha hagut les decepcions degudes a les armes químiques, biològiques i nuclears, amb possibilitats reals d'una destrucció gairebé total de la vida humana en la Terra, els problemes ambientals deguts a un desenvolupament incontrolat de la industrialització; i el descobriment d'alguns límits fonamentals de la ciència (relativitat, mecànica quàntica, indecidibilitat, impredictibilitat). En el vessant politicoideològic, destaca la caiguda del sistema soviètic i el descrèdit del marxisme com a filosofia política, i l'extensió d'un capitalisme liberal atent només al benefici a curt termini.

El segle XX ha estat el segle del temps: l'ha fet esclatar tant en la immensitat del passat de l'Univers i de la Terra com en la fugacitat extrema de les partícules, en moltíssims descobriments teòrics i pràctics sobre el temps i la memòria. El segle XXI, a més de seguir la recerca científica i de realitzar-ne les potencialitats, ha de desenvolupar la reflexió humanística i ètica a què ens inviten aquests progressos, les urgències de la seva aplicació i l'increment de temps lliure que ens proporciona, en principi, comptar amb una esperança de vida més dilatada.

BIBLIOGRAFIA

La bibliografia sobre aquests temes és vastíssima. No m'he proposat, doncs, una panoràmica exhaustiva, sinó que m'he limitat a la bibliografia consultada al llarg de la redacció d'aquest text, que donarà al lector interessat més detalls i referències.

CAPÍTOL 1

- BARROW, J. *The world within the world*. Oxford: Oxford University Press, 1988.
- BRISSON, F.; MAYERSTEIN, F. W. *Inventer l'Univers: Le problème de la connaissance et les modèles cosmologiques*. París: Les Belles Lettres, 1991.
- CARRIERE, J. C.; DELUMEAU, J.; ECO, U.; GOULD, S. J. *La fi del temps*, Barcelona: Empúries, 1999.
- CASSÉ, M. *Du vide et de la création*. París: Jacob, 1995.
- CHANGEUX, J. P.; CONNES, A. *Materia de reflexión*. Barcelona: Tusquets, 1995. (Metatemas; 30)
- DONCEL, M. G., HERMANN, A., MICHEL, L.; PAIS, A. *Symmetries in physics (1600-1980)*. Bellaterra: Publicacions de la UAB, 1987.
- DURAN, X. *L'esperit de la ciència*. València: Tres i Quatre, 1991.
- FEYNMANN, R. *El caràcter de las leyes físicas*. Barcelona: Antoni Bosch ed., 1981.
- GARDNER, M. *Izquierda y derecha en el cosmos*. Barcelona: Salvat Divulgación, 1985.
- GLASHOW, L. S. *El encanto de la física*. Barcelona: Tusquets, 1991. (Metatemas; 37)

- JOU, D. *Matèria i materialisme*. Barcelona: La Magrana, 1999.
- LEVY-LEBLOND, J. M. «Constants of Physics». *Rivista del Nuovo Cimento*, núm. 7 (1977), p. 187.
- NICOLAU, F. *Ciències físiques i filosofia de la naturalesa*. Barcelona: Catalunya Cristiana, 1991.
- PAIS, A. *Inward bound: On matter and forces in the physical world*. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- SPIRIDÓNOV, O. *Constantes físicas universales*. Moscou: MIR, 1986.
- WHEELER, J. A. *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza, 1994.

CAPÍTOL 2

- BERTRANPETIT, J.; JUNYENT, C. *Viatge als orígens*. València: Bromera, 1997.
- BISHOP, J. E.; WALDHOLZ, M. *Genoma*. Barcelona: Plaza & Janés, 1992.
- CRICK, F. *La búsqueda científica del alma*. Madrid: Debate, 1994.
- DAWKINS, R. *El gen egoísta*. Barcelona: Salvat, 1985.
- DURAN, X. *El cervell polièdric*. València: Bromera, 1996.
- JAHN, I.; LOTHER, R.; SENGLAUB, K. *Historia de la biología*. Barcelona: Labor, 1990.
- MORA, F. [ed.]. *El problema cerebro-mente*. Madrid: Alianza, 1996.
- NICOLAU, F. *El cervell i l'ànima humana*. Barcelona: Catalunya Cristiana, 1990.
- ROUBAUD, J.; BERNARD, M. *Quel avenir pour la mémoire?* París: Gallimard, 1997.
- SERRES, M. [ed.]. *Historia de las ciencias*. Madrid: Cátedra, 1991.
- TOBEÑA, A. *Neurotafaneries*. València: Bromera, 1999.
- *Intimitats del cervell humà*. Barcelona: La Campana, 1994.

CAPÍTOL 3

- BARNETT, J. E. *El péndulo del tiempo. En pos del tiempo: de los relojes de sol a los atómicos*. Barcelona: Península, 2000.
- COVENEY, P.; HIGHFIELD, R. *La flecha del tiempo*. Barcelona: Plaza & Janés, 1992.

- FRASER, J. T. *Génesis y evolución del tiempo*. Pamplona: Pamiela, 1992.
- *Tiempo, pasión y conocimiento*. Pamplona: Pamiela, 1993.
- GOULD, S. J. *La flecha del tiempo*. Madrid: Alianza, 1992.
- HAWKING, S. *Breu història del temps*. Barcelona: Crítica, 1988.
- LIGHTMAN, A. *Els somnis d'Einstein*, Barcelona: Columna, 1992.
- MARTÍNEZ ALIER, J. *Economia i ecologia*. Barcelona: Edicions 62, 1982. (Llibres a l'Abast)
- MORRIS, R. *Las flechas del tiempo*. Barcelona: Salvat, 1986.
- *Time's armours: scientific attitudes towards time*. Nova York: Simon and Schuster, 1984.
- PETERSON, I. *El reloj de Newton: Caos en el sistema solar*. Madrid: Alianza, 1995.
- PRIGOGINE, I. *La nueva alianza*. Madrid: Alianza, 1984.
- *Entre el tiempo y la eternidad*. Madrid: Alianza, 1990.
- RIERA i TUÈBOLS, S. *Origen i evolució de l'Univers*. Barcelona: Edicions 62, 1998.
- REEVES, H. *La première seconde*. París: Seuil, 1995. 2v.
- WEINBERG, S. *Los tres primeros minutos del Universo*. Madrid: Alianza, 1985.

CAPÍTOL 4

- ARKING, R. *Biology of aging*. Sinauer, 1998.
- ARTIGAS, M. *Las fronteras del evolucionismo*. Madrid: Libros MC, 1985.
- BAERT, P. J. N. [ed.]. *Time in contemporary intellectual thought*. Amsterdam: North Holland, 2000.
- BRASH, D. P. *El envejecimiento*. Barcelona: Salvat Divulgación, 1986.
- DAWKINS, R. *El relojero ciego*. Barcelona: Labor, 1988.
- FRIEDMAN, W. J. *About time: inventing the fourth dimension*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1990.
- GOULD, S. J. *El pulgar del panda*. Barcelona: Crítica, 1994.
- KIRKWOOD, T. *El fin del envejecimiento*. Barcelona: Tusquets, 2000. (Metatemas; 64)
- MAYOR ZARAGOZA, F. *Un món nou*. Barcelona: UNESCO de Catalunya; Institut d'Estudis Catalans, 2000.
- MORIN, E. *L'homme et la mort*. París: Seuil, 1970.

El temps i la memòria en la ciència contemporània

- NICOLAU, F. *L'evolucionisme, avui*. Barcelona: Catalunya Cristiana, 1976.
- PIAGET, J. *The child's conception of time*. Londres: Routledge and Kegan Books, 1969.
- POPPEL, E. «Time perception». A: HELD, R. [et al.] *Handbook of Sensory Physiology*. Nova York: Springer, 1978, p.713-729.
- RUFFIÉ, J. *De la biologie à la culture*. París: Flammarion, 1983. 2v.
- WAGENSBERG, J.; AGUSTÍ, J. [ed.]. *El progreso: ¿Un concepto acabado o emergente?* Barcelona: Tusquets, 1998. (Metatemas; 52)

Les revistes *Investigación y Ciencia* i *Mundo Científico* són dues fonts d'informació amb nombrosos articles sobre aquests temes.

De la revista *Investigación y Ciencia*, destaco els articles següents, apareguts a partir de 1990:

- BECK, G.; HABICHT, G. S. «Origen de la inmunidad en los invertebrados». Núm. 244 (gener 1997), p. 4.
- CHIAO, R. Y.; KWIAT, P. G.; STEINBERG, A. M. «Más veloz que la luz?». Núm. 205 (octubre 1993), p. 14.
- DEUTSCH, D.; LOCKWOOD, M. «Física cuántica de los viajes por el tiempo». Núm. 212 (maig 1994), p. 48.
- ENGELHARD, V. H. «Presentación celular de los antígenos». Núm. 217 (octubre 1994).
- FUSTER, J. M. «Redes de memoria». Núm. 250 (juliol 1997).
- GREIDER, C. W.; BLACKBURN, E. H. «Telómeros, telomerasa y cáncer». Núm. 235 (abril 1996), p. 20.
- «Informe especial: frutos del genoma humano». Núm. 288 (setembre 2000), p. 34.
- ITANO, W. M.; RAMSEY, N. F. «La medición exacta del tiempo». Núm. 204 (setembre 1993), p. 44.
- JANEWAY, C. A. «Reconocimiento inmunitario de cuerpos extraños». Núm. 206 (novembre 1993).
- KEMPERMAN, G.; GAGE, F. H. «Regeneración de las células nerviosas en adultos». Núm. 274 (juliol 1999), p. 14.
- KLEIN, J.; TAKAHATA, N.; AYALA, F. J. «Polimorfismo del MHC y origen del hombre». Núm. 215 (agost 1994), p. 14.
- LITMAN, G. W. «Origen de la inmunidad de los vertebrados». Núm. 244 (gener 1997), p. 10.

- MOYZIS, R. K. «El telómero humano». Núm. 181 (octubre 1991), p. 24.
- NOWACK, M. A.; MCMICHAEL, A. J. «Así destruye el SIDA las defensas inmunitarias». Núm. 229 (octubre 1995), p. 20.
- OLSHAMSKY, S. J.; CARNES, B. A.; KASSEL, C. K. «Envejecimiento de la especie humana». Núm. 201 (juny 1993), p. 8.
- RUSTING, R. L. «¿Por qué envejecemos?». Núm. 197 (febrer 1993), p. 74.
- SCHWARTZ, R. H. «Anergia de las células T». Núm. 205 (octubre 1993), p. 24.
- «Sistema inmunitario». Núm. 206 (monogràfic, novembre 1993).
- STREIT, W. J.; KINCAID-COLTON, C. A. «El sistema inmunitario del cerebro». Núm. 232 (gener 1996), p. 16.
- STROGATZ, S. H.; STEWART, I. «Osciladores acoplados y sincronización biológica». Núm. 209 (febrer 1994), p. 54.
- TARRACH, R. «Velocidades superlumínicas y causalidad». Núm. 241 (octubre 1996), p. 62.
- WEINDRUCH, R. «Restricción calórica y envejecimiento». Núm. 234 (març 1996), p. 12.
- YOUNG, M. «La cadencia del reloj biológico». Núm. 284 (maig 2000), p. 7.

De la revista *Mundo Científico*, el número 198 (febrer 1999) és un monogràfic dedicat a la teràpia gènica; el número 205 (setembre 1999), un monogràfic dedicat a l'envelliment, i el número 194 (octubre 1998), un dossier dedicat a l'estudi de si estem determinats pels gens. Alguns articles publicats a partir de 1998 són:

- HÜSSING, B.; REY, L. «El xenotrasplante bajo todas sus suturas». Núm. 203 (juliol-agost 1999), p. 46.
- LE MASSON, G.; LAFLAQUIÈRE, A.; BAL, T.; LE MASSON, S. «Neuronas biológicas y neuronas artificiales». Núm. 197 (agost 1999), p. 19.
- PENNISI, E. «Los secretos del genoma de *C. Elegans*». Núm. 201 (maig 1999), p. 22.
- STRAUSS, E. «El tiempo variable de los relojes de DNA». Núm. 204 (setembre 1999), p. 20.

Altres revistes

La revista *Quark* dedicà el número 18 (juliol 2000) a «Internet i el genoma humano, dos revoluciones en marcha».

CURZON, F. L.; AHLBORN, B. *American Journal of Physics*, núm. 43 (1975), p. 22-26.

POSETIROMER, P. G.; KAHN, K.; POMPEA, S. M. «Nautiloid growth rythms and dynamical evolution of the earth-moon system», *Nature*, núm. 275 (1978), p. 606-611.

WELLS, J. W. «Coral growth and geochronometry». *Nature*, núm. 197 (1963), p. 948-950.

ÍNDEX

Pròleg	5
I. LA MEMÒRIA	11
1. La física i la permanència	17
1.1. Les lleis de conservació	19
1.2. Les constants físiques universals	35
1.3. Les simetries	46
1.4. Conclusions	52
2. La biologia i la memòria	55
2.1. La memòria genètica	56
2.2. La memòria neuronal: el cervell	69
2.3. El sistema immunitari	79
2.4. Conclusions	82
II. EL TEMPS	91
3. La física i el temps	97
3.1. Unitats i mesures del temps	98
3.2. El temps en mecànica	103
3.3. La relativitat i el temps	108
3.4. Cosmologia: l'inici i la fi del temps	114
3.5. Termodinàmica: la fletxa del temps	120
3.6. Conclusions	126
	175

El temps i la memòria en la ciència contemporània	
4. El temps en biologia	129
4.1. El temps regulador: rellotges biològics	130
4.2. El temps creador: l'evolució	141
4.3. El temps destructor: l'envelliment	151
4.4. Conclusions	161
Consideracions finals	165
Bibliografia	169



MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES

- 11. ELS ORÍGENS**
a cura de J. G. Peretó
i S. Alegret
- 12. MODELITZACIÓ
MACROSCÒPICA
EN CIÈNCIES
EXPERIMENTALS**
a cura d'E. Casassas
i M. Esteban
- 13. DEL PLAER DELS SENTITS
AL PLAER DE LES XIFRES**
a cura d'E. Casassas
i R. Tauler
- 14. FRONTERES DE
LA CIÈNCIA**
a cura de S. Alegret
i J. G. Peretó
- 15. LLUM I COLOR**
a cura de J. G. Peretó
i S. Alegret

